

УДК 661.931(571.65)

ПЕРСПЕКТИВЫ КРАЙНЕГО СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ НА ПРОИЗВОДСТВО «ЗЕЛЕННОГО» ВОДОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Глотов В. Е.

ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт

им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

E-mail: geocol@neisri.ru

Впервые для территории Крайнего Северо-Востока России, омываемой морями двух океанов, дана комплексная оценка перспектив производства водорода способом электролиза воды с использованием климатических источников энергии и ультрапресной воды горных рек. С учетом выявленных региональных особенностей рассчитано, что при современном техническом уровне развития количество производимого водорода в регионе будет контролироваться только объемом потребляемой ультрапресной воды горных рек. С учетом этого фактора, расходуя не более 10 % общего стока – 18 млрд м³ воды, можно ежегодно получать 2·10⁹ т «зеленого» водорода за счет работы ветровых и солнечных электростанций. Для размещения последних экологически рационально использовать площади горных тундр и лесотундр на выложенных и плоских водоразделах.

Ключевые слова: Северо-Восток России, «зеленый» водород, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетические установки, солнечные электростанции, водные ресурсы, сглаженные низкогорья.

DOI: 10.34078/1814-0998-2023-4-30-41

ВВЕДЕНИЕ

В «Концепции развития водородной энергетики Российской Федерации», принятой и утвержденной Правительством РФ 05.08.2021 (Концепция..., 2021), отражены роль и экологическая значимость в социально-техническом развитии России нового для страны направления – производство, транспортировка и использование водорода. Водород по содержанию CO₂ и способу производства принято разделять по «цвету». В частности, водород, получаемый методом паровой конверсии метана, называют «голубым». Наиболее экологичным считается водород «зеленый», который получают за счет электролиза воды с использованием возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) (Шафиев и др., 2020). Россия обладает значительными запасами метана – сырья для «голубого» водорода, но страны, контролируемые международный рынок, в том числе по причинам конкурентного характера, могут считать более предпочтительным «зеленый». Производство его отвечает общим требованиям перехода к устойчивому мировому развитию, т. к. вовлекает в хозяйственный оборот ВИЭ и водные ресурсы. Надо отметить, что про-

блема получения этого водорода в нашем регионе обсуждалась и ранее в опубликованных статьях И. М. Долинской и Е. М. Яковенко (2023), Н. Н. Дудова и др. (2008), В. М. Зайченка и др. (2020), однако перспективы региона на его производство оценивали по величине общей мощности ВИЭ без учета природных условий территории их освоения и без оценки ресурсной сырьевой базы – воды, как носителя этого газа.

Цель данной статьи – оценить перспективы производства «зеленого» водорода на отдаленной окраине России – Крайнем Северо-Востоке – с использованием климатических возобновляемых источников энергии и пресных природных вод при учете природных особенностей региона.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

оценить потенциальную энергетическую мощность климатических ВИЭ, которые можно реально вовлечь в производство «зеленого» водорода до 2050 г.;

оценить ресурсную сырьевую базу для производства «зеленого» водорода, т. е. ресурсы пресной воды;

оценить реальные масштабы производства «зеленого» водорода с учетом выявленных природных особенностей распространения климатических ВИЭ.

Научная и практическая актуальность цели определяется ее соответствием Концепции развития водородной энергетики в России.

Методы и материалы исследований типичны для обобщающих работ и включают в себя:

изучение опубликованных, в том числе и электронных, работ, содержащих результаты многолетних наблюдений на метеопостах Колымского управления гидрометеорологической службы и других источников; достижения исследований по преобразованию ВИЭ в электрическую; способы получения водорода;

изучение и анализ материалов о географических особенностях региона, составе и ресурсах пресных вод;

расчеты усредненных данных об энергетической мощности отдельных видов восполняемых источников энергии. При этом учитывали, что преобразование потенциальной мощности рассматриваемого источника в возможную годовую выработку электроэнергии происходит с потерей энергии. При расчетах генерации водорода мы определяли объемы необходимых для электролиза пресной воды.

Объект исследований – географические, климатические и мерзлотно-гидрогеологические особенности Крайнего Северо-Востока России, способствующие формированию различных видов ВИЭ и сырьевых ресурсов для производства водорода.

Предмет исследования – климатические источники ВИЭ, пресные воды – поверхностные и подземные.

ПРИРОДНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматриваемый в статье регион – Крайний Северо-Восток России (КрСВ РФ) – охватывает территории в основном Магаданской области (МО), Чукотского автономного округа (ЧАО), северо-восточные улусы Республики Саха (Якутия) и северной части Корякского национального округа (КНО) Камчатского края. Суммарная площадь их примерно 1.5 млн км². Географически регион является полуостровом, отделенным от Восточной Сибири Колымо-Индигоирским водоразделом и омываемым морями двух океанов – Северного Ледовитого (морья Восточно-Сибирское и Чукотское) и Тихого (Охотское и Берингово). Главный водораздел Земли делит регион на две области стока поверхностных и подземных вод – Циркумарктическую (ЦАО) и Циркумтихоокеаническую (ЦТО) (рис. 1).

Климат КрСВ РФ связан с окружением региона холодными морями и расположением его севернее 59° с. ш. Примерно треть его лежит выше Полярного круга (66° 20' с. ш.), официально вся площадь ЧАО и часть северных улусов Респу-

блики Саха (Якутии) отнесена к арктической. Остальная площадь является субарктической. Географические особенности предопределили распространение на побережье, ширина которого до нескольких десятков км, господства холодного морского климата. Во внутриконтинентальных районах, как в ЦАО, так и в ЦТО, климат очень холодный резко континентальный.

Формирование климата в ЦАО происходит за счет привноса тепла и влаги из Атлантического океана, которые охлаждаются и осушаются над поверхностью Северного Ледовитого океана и прилегающего к нему материка. В зоне контакта этого океана с Тихим происходят прорывы тихоокеанских циклонов, приносящие зимой оттепели длительностью до недели (Клюкин, 1970). По указанным причинам на морском побережье ЦАО среднегодовые температуры воздуха колеблются от –9.5 °С на востоке (г. Певек) до –7.1 °С на западе (пос. Уэлен). В холодный период года, с октября по апрель, когда температура воздуха в течение суток ниже 0 °С, средняя температура понижается до –14.7 °С (табл. 1). Погода в теплый период года (май–сентябрь) отличается невысокими положительными температурами (среднемесячная в июле не выше +7 °С), пасмурностью, постоянными туманами, повышенной ветреностью, которая резко усиливается в осенние и весенние месяцы (до 60 м/с и более).

Континентальные районы ЦАО отличаются резкими контрастами температур по сезонам года, практически безветренной погодой и очень низкими температурами воздуха в зимние месяцы: среднемесячная температура в холодный период с октября по апрель от –20 °С до –26.3 °С с абсолютными минимумами ниже –53 °С. Среднегодовая скорость ветра в 2–3 раза меньше, чем на морском побережье.

Климат ЦТО формируется за счет поступления тихоокеанских воздушных масс. Из-за влияния относительно теплых и влажных циклонов среднегодовая температура на побережье Берингова моря от –5.6 °С до –7.1 °С, на охотоморском побережье – от –2.6 °С до –4 °С (пос. Чайбуха). В теплые месяцы преобладает пасмурная погода, с повышенной ветреностью (средняя годовая скорость больше 4.9 м/с) (Клюкин, 1960).

Во внутриконтинентальных районах ЦТО температура воздуха и количество осадков выше, чем в ЦАО. Например, в пос. Энмываам (ЦТО), находящемся примерно на одинаковой широте с пос. Омолон (ЦАО), среднегодовая температура почти на 3 °С выше (таблица 1). Скорость ветра больше, чем в ЦАО, но повсеместно меньше 3 м/с.

По интенсивности солнечной радиации внутриконтинентальные районы на всей площади КрСВ РФ характеризуются достаточно близкими значениями (3541–3630 мДж/м²). Солн-

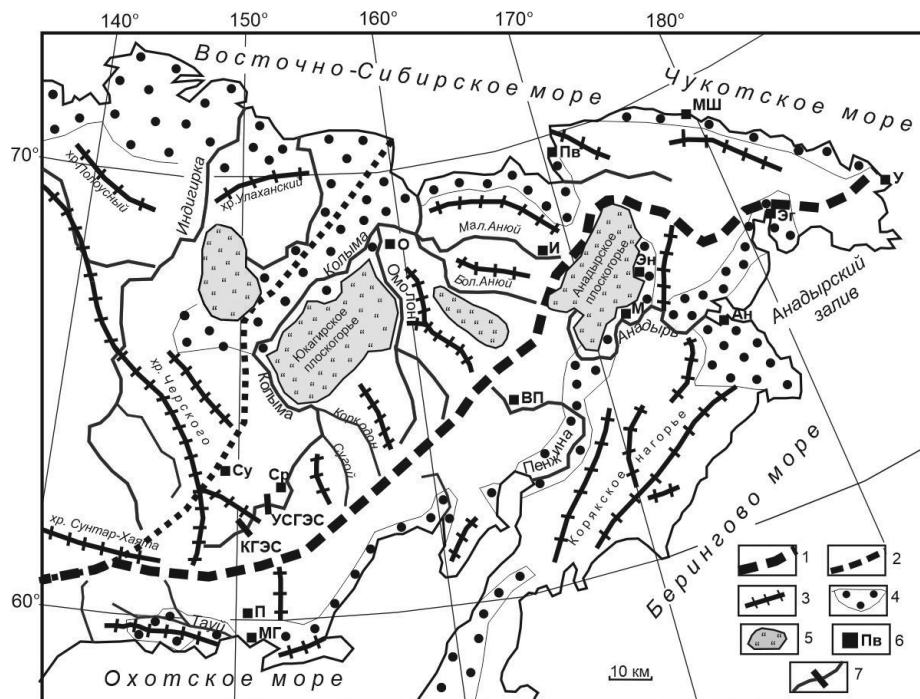


Рис. 1. Орогидрографическая схема Крайнего Северо-Востока России с использованием (Раковская, Давыдова, 2002): 1 – Главный водораздел Земли; 2 – водораздел бассейнов рек Колыма и Индигирка; 3 – наиболее крупные хребты с альпинотипным рельефом; 4 – низменности; 5 – наиболее значительные по площади плоскогорья;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

Fig. 1. Physical and geographical scheme of Russia's Far North-East: 1 – Great Water Divide of the Earth; 2 – watershed of the Kolyma and Indigirka River basins; 3 – largest ridges with alpine-type relief; 4 – lowlands; 5 – most significant plateaus in terms of area; 6 – weather stations, including those in the Central Administrative District: Пв – Pevek; МШ – Cape Schmidt, У – Uelen, И – Ilirney, О – Omolon, Ср – Srednekan, Су – Susuman; in the CTO: А – Anadyr, Эн – Enmelen, М – Markovo, Эг – Egvekinot; ВП – Verkhne-Penzhino, Мг – Magadan, П – Palatka; 7 – alignments of operating HPPs, incl. КГЭС – Kolyma HPP, УСГЭС – Ust-Srednekan HPP.

це с апреля по сентябрь светит не менее 10 часов в сутки. За год этот показатель больше 2000 часов. Вероятность пасмурного неба не более 26 % (Клюкин, 1960), поэтому сумма солнечной радиации при средних условиях облачности за теплый сезон года составляет 84–90 % годовой (таблица 2).

Из таблицы 2 следует, что сумма солнечной радиации в теплый сезон по отношению к годовой растет с юга на север. За Полярным кругом она превысит 90 % от годовой.

Данные об активности солнечной инсоляции на морском побережье КрСВ РФ нами не выявлены. По длительности солнечного сияния можно полагать, что она на 30–50 % меньше аналогичного показателя во внутриконтинентальных районах. Это вызвано преобладанием пасмурной погоды и дней с туманами на морском побережье. Так, число дней с туманами в районе г. Магадана 14–17 в июне, до 20 в июле и августе. В районе п-ова Пьягина дней с туманами в летние месяцы больше 20. Пасмурное состо-

яние неба – до 80 % в июне и до 67 % осенью (Клюкин, 1960).

Рельеф определяет вертикальную поясность количественных показателей климатических ВИЭ в конкретных участках местности. Известно, например, что в горных районах КрСВ РФ скорость ветра в речных долинах в теплое время года примерно на 50 % меньше, чем на водоразделах. Так, по данным многолетних наблюдений на метеостанциях (МС) в бассейне Верхней Колымы, средняя скорость ветра на МС «Стоковая верхняя» (абс. отметка 1220 м) за период апрель–сентябрь составлял 3.7 м/с, на МС «Стоковая нижняя» (абс. отметка 803 м) – 2 м/с. В период отрицательных температур атмосферы в долинах движение воздуха усиливается за счет его охлаждения и направлено со склонов к ее днищу (Прикладной..., 1960).

Солнечная инсоляция в долинах также меньше, чем на водоразделах, что связано с экранированием Солнца возвышенными формами рельефа. В зимнее время при низком стоянии Солнца над горизонтом в долинах горных рек более ко-

Таблица 1. Климатические показатели Крайнего Северо-Востока России (Научно-прикладной..., 2022)

Table 1. Climatic indicators of Russia's Far North-East (Climate..., 2022)

№ на схеме	Метеостанция; абс. отметка, м; координаты широты	Средние многолетние показатели				
		Годовая температу- ра – Т °С	Т °С хо- лодного периода (Х–IV)	Осадки, мм	Ветер, сред- ний за год, м/с	Годовая сумма сол- нечной радиации при средней облач- ности, МДж/м ²
1. Циркумарктическая область (ЦАО)						
А. Морское побережье						
1.1.	Г. Певек, 23 м; 69° 55' с. ш.	–9.5	–14.5	221	4,5	н. с.*
1.2.	Мыс Шмидта; 7 м; 68° 55' с. ш.	–10	–14.7	262	5	н. с.
1.3.	Пос. Уэлен; 7 м; 66° 10' с. ш.	–7.1	–14.3	386	6.1	н. с.
Б. Внутриконтинентальные районы						
1.4.	Пос. Илирней, 412 м; 67° 20' с. ш.	–11.6	–26.2	240	1.4	н. с.
1.5.	Пос. Омолон; 260 м; 65°32' с. ш.	–11.9	–26.3	256	1.5	3606
1.6.	Г. Сусуман; 726 м; 62° 51' с. ш.	–12.5	–28.8	287	1.8	н. с.
1.7.	Пос. Среднекан; 206 м; 62° 25' с. ш.	–10.6	–25.3	420	1.3	3630
2. Циркумтихоокеаническая область						
А. Морское побережье						
2.1.	Пос. Эгвекинот; 28 м; 66° 15' с. ш.	–5.6	–13.3	547	4.7	н. с.
2.2.	Г. Анадырь; 62 м; 64° 47' с. ш.	–7.1	–14.5	366	6.6	н. с.
2.3.	Г. Магадан; 25 м; 59° 33' с. ш.	–2.4	–10.1	585	3.6	н. с.
Б. Внутриконтинентальные районы						
2.4.	Пос. Энмываам; 74 м; 66° 53' с. ш.	–8.9	–20.3	547	1.9	н. с.
2.5.	Пос. Марково; 26 м; 64° 41' с. ш.	–8.3	–19.9	408	2.2	3541
2.6.	Пос. Верх. Пенжино; 355 м; 64° 13' с. ш.	–9.9	–22	353	1.8	н. с.
2.7.	Пос. Палатка; 341 м; 60° 06' с. ш.	–8.1	–19.8	456	2.8	н. с.

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

Таблица 2. Солнечная радиация на репрезентативных метеостанциях (Научно-прикладной..., 2022)

Table 2. Solar radiation at representative weather stations (Climate..., 2022)

№ по таблице 1	Метеостанция; абс. отметка, м; широта – град., мин.	Годовая сумма солнечной радиации – МДж/м²	Солнечная радиация по сезонам года:			
			теплый сезон (апрель–сентябрь)		холодный сезон (октябрь–март)	
			МДж/м²	% годовой суммы	МДж/м²	% годовой суммы
1.5.	Омолон, 260; 65° 32'	3606	3119	86.5	487	13.5
1.7.	Среднекан, 206; 62° 25'	3630	3034	83.6	596	16.4
2.5.	Марково, 26; 64° 13'	3540	3030	85.6	511	14.4

роткий солнечный день, возможно и полное его отсутствие, даже в районах южнее Полярного круга.

Аналогичная высотная поясность климатических характеристик существует и на морском побережье.

Роль рельефа является решающей при выборе участков размещения инженерных сооружений, преобразующих ВИЭ в электрическую. Поскольку природные источники представляют рассеянную форму энергии, то инженерные устройства по ее аккумуляции занимают большие площади. Например, по последним данным, крупнейшие в мире солнечные электростанции

(СЭС) занимают участки для солнечных батарей в 2–2.5 га для обеспечения мощности в 1 МВт (Вольф, 2021).

Устройства по преобразованию энергии ветра отличаются высотой башни для установки ветрогенератора до 150–180 м и весом до 6 тыс. т. Фундамент такой башни обеспечивает устойчивость сооружения и представляет собой массивную железобетонную квадратную призму (Шевченко, 2006; Польшевская, Куимова, 2015). Разумеется, подобные сооружения должны возводиться на непросадочных скальных или полускальных породах. С инженерно-геологических позиций в условиях КрСВ РФ межгорные впадины и при-

брежно-морские низменности непригодны для строительства крупных ветроэлектростанций из-за широкого распространения просадочных мерзлых льдистых четвертичных отложений (Инженерная геология..., 1977). Для строительства ветровых и солнечных электростанций неблагоприятны и склоны горных сооружений как очень крутые, так и пологие из-за подверженности их активным инженерно-геологическим процессам. На крутых развиты осыпи, оползни, курумы, в зимнее время – снежные лавины. У подножия склонов скапливаются коллювиальные образования, обычно насыщенные льдом. На пологих склонах общераспространенными процессами являются солифлюкция и оползание покровных отложений под влиянием сезонного промерзания – оттаивания грунтов (Мытарева, Глотов, 1977).

По указанным обстоятельствам наиболее перспективны для размещения солнечных и ветровых электростанций выложенные водоразде-

лы и прилегающие к ним верхние части пологих склонов южных экспозиций, встречающихся и в среднегорьях, но наиболее развитых в районах низкогорного рельефа. Водоразделы слабо-расчлененных низкогорий и плоскогорий представлены фрагментами мезо-кайнозойской пенепленизированной равнины. Распространены и структурно-денудационные плоские или слабо-наклонные поверхности позднемиоценовых и кайнозойских лавовых потоков, свойственные в нашем регионе плоскогорьям, нагорьям и низкогорьям, а также вулканическим покровам вулканогенных поясов. Крупнейшим из последних является Охотско-Чукотский вулcano-плутонический пояс.

На сглаженных и плоских водоразделах развиты горные тундры и лесотундры с примитивными почвами на маломощном (менее 2 м) элювиально-делювиальном щебенчато-дресвяном слое, подстилаемом скальными породами. Сооружение и

эксплуатация солнечных или ветровых электростанций на таких водоразделах имеют также большие экологические преимущества по сравнению с долинами, средними и нижними участками горных склонов. Последние обычно заняты редкостойной тайгой и зарослями кедрового стланика – местами обитания зверей и птиц. Кроме того, в днищах долин горных рек криолитозоны развиты подрусьевые и пойменные талики, которые с биологической точки зрения являются оазисами жизни в краю вечной мерзлоты. Поэтому размещение на склонах и в речных долинах ветро- и/или солнечных электростанций приведет к экологически негативным последствиям.

На рис. 2 (фото) показаны репрезентативные фрагменты выложенных низкогорий, в пределах которых водоразделы весьма перспективны для строительства ветроэнергостановок и СЭС.

В районах резко расчлененных гор также есть участки с сохранившимися фрагментами пенеплена, структурно-денудационных плоских или слабо наклонных лавовых, обычно базальтовых, покро-

2a



2б



Рис. 2. Фрагменты выложенных низкогорий: 2а – участок побережья Охотского моря в районе г. Магадан; фото автора; 2б – внутриконтинентальный район, Юкагирское плоскогорье, правобережье р. Колыма (по материалам wikiway.com/russiac/magadan/photo, обращение 03.07.2023).

Fig. 2. Fragments of flattened lowlands: 2a – area of the Sea of Okhotsk coast near the city of Magadan; photo by the author; 2б – inland district, the Yukagir Highlands, right bank of the Kolyma River (based on materials from wikiway.com/russiac/magadan/photo, accessed 03.07.2023).

вов. По прикидочным расчетам, с использованием топокарт в масштабе 1 : 1 000 000, общая площадь, перспективная на участки для сооружения будущих климатических электростанций, составляет около 300 тыс. км², т. е. примерно 25 % общей площади внутриконтинентальных районов.

Мерзлотно-гидрогеологическая обстановка, определяющая формирование и распространение сырья для производства водорода – пресных подземных и поверхностных вод, характеризуется развитием многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью 500–600 м на водоразделах и 180–200 м в речных долинах (Гольдтман, 1972). При сезонном оттаивании образуется сезонно водоносный слой. Под руслами водотоков при мощности водопроницаемых пород более 4–5 м существуют водоносные талики (Шепелев, 2011).

Возникновение ММП в четвертичное время привело к вымерзанию регионально распространенной зоны выветривания скальных пород. Во внемерзлотных районах эта зона является основным водоносным комплексом, за счет подземных вод которого питаются реки и возможна организация водоснабжения. В зоне развития ММП водоносная зона гипергенеза сохранилась только в речных долинах, размеры и геологические условия которых благоприятны для образования таликов, в том числе и сквозных.

По изложенным обстоятельствам основное питание рек здесь снежно-дождевое и подземными водами сезонно-талого слоя. Это приводит к формированию ультрапресных подземных и поверхностных вод с общей минерализацией обычно менее 50 мг/дм³ и содержанием хлор-иона не более 5 мг/дм³ (Гидрогеология..., 1972). Их суммарный годовой сток в окружающие моря достигает 180 км³ (Многолетние..., 1985). Наступление холодного периода года и выпадение твердых осадков приводят к деградации водоносного сезонно-талого слоя, перемерзанию и пересыханию большинства малых и средних водотоков. В реках с круглогодичным стоком наступает критический водный период примерно с конца ноября до конца апреля. В последней декаде марта – первой декаде апреля сток в крупных реках с водосборными площадями более 10 тыс. км² сокращается в 80–100 раз (Многолетние..., 1985). В этот период ресурсный потенциал пресных подземных вод самый малый в России. На площади ЦАО модуль этого потенциала меньше 0.1 л/с·км², на площади ЦТО – в пределах 0.1–0.5 л/с·км² (Боревский и др., 2013). Можно считать, что в теплое время года регион относится к водообеспеченным, а в зимнее – к дефицитным по ресурсу пресной воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОСПОЛНЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Природные особенности объекта исследования и уровень технического развития предопределили возможности получения электричества из возобновляемых источников энергии ветра и Солнца.

Энергия ветра доступна для получения электричества на морском побережье, где скорость ветра большую часть года превышает 3 м/с. Во внутриконтинентальных районах во все сезоны года она менее указанного значения, необходимого для работы ветродвигателей (Осокин и др., 2019). Опыт эксплуатации ветродвигателей для получения электроэнергии есть в ЧАО. Здесь, на побережье Анадырского залива Берингова моря около 5 месяцев в году работает энергоустановка мощностью 3.5 МВт. В арктическом районе Республики Саха (Якутия) функционирует в пос. Тикси подобная установка мощностью 0.94 МВт. Планируется создание их сети на Чукотском п-ове (Мингалеева и др. 2014; Ермоленко и др., 2017). По опыту работ единичных ветроустановок можно считать их эффективными средствами экономии дизельного топлива. Выявлены реальные недостатки установок, связанные с резкими перепадами скорости ветра, обледенением установок в зимнее время, зимними ураганами.

Оценка общего ветроэнергетического потенциала морских побережий КрСВ РФ была ранее выполнена Ю. А. Соколовским (1970). За прошедшие 50 лет изменения скорости ветра находятся в пределах ошибок региональных оценок, поэтому мы привели сведения этого исследователя (таблица 3).

Полученные данные впечатляют величинами энергетических ресурсов. Однако реально ветродвигатели по инженерно-геологическим, экономическим и экологическим причинам, рассмотренным выше, могут быть установлены на побережье примерно в 0.1 % его общей длины. Следовательно, при расчетах прогнозов выработки водорода за счет энергии ветра приведенные величины расчетной годовой выработки надо уменьшать в 1000 раз. Уменьшенную величину технической оценки Ю. А. Соколовского мы использовали для расчета годовой (8760 час.) выработки электроэнергии. Учитывали КПД современных ветрогенераторов в пределах 25–35 %. Для надежности он принят в 25 %. С учетом этих ограничений в таблице № 3 приведены сведения о теоретически вероятной выработке электроэнергии, которые тысячекратно превышают выработку Колымской ГЭС.

Перспективность развития ветроэнергетики на побережьях арктических, Берингова и Охотского морей показана и в работе М. В. Шевченка (2006). Он считает, что наиболее перспек-

Таблица 3. Энергетические ресурсы ветра на побережье морей Крайнего Северо-Востока Российской Федерации (с использованием материалов Ю. А. Соколовского, 1970)

Table 3. Wind energy resources on the coast of the Far North-East seas in the Russian Federation (based on Yu. A. Sokolovsky, 1970)

№ п/п	Море, участки побережья	Энергетические ресурсы, $\text{н} \cdot 10^9 \text{ кВт}$		Расчетная годовая выработка электроэнергии, $\text{кВт} \cdot \text{ч}$
		Теоретическая оценка	Техническая оценка (30 % теоретической)	
1	Восточно-Сибирское, от устья р. Колыма до мыса Шмидта	290	96.6	$254 \cdot 10^{12}$
2	Чукотское, от мыса Шмидта до мыса Дежнева	370	123.3	$324 \cdot 10^{12}$
3	Берингово, от мыса Дежнева до устья р. Хатырка	790	263.3	$692 \cdot 10^{12}$
4	Охотское, от устья р. Пенжина до устья р. Улья	770	256.6	$674 \cdot 10^{12}$
	Всего	12220	739.9	$1944 \cdot 10^{12}$

тивными для размещения ветроэнергетических установок являются участки шельфа на удалении от побережий в 10–20 км. На этом расстоянии удельная мощность ветрового потока в 1.5–2 раза возрастает относительно самого побережья, достигая 750–2000 Вт/м². Однако при этих рекомендациях не учтена повышенная ледовитость и дрейфующий характер ледовых полей в этих морях до 10 месяцев в году (Добровольский, Залогин, 1982). Кроме того, сооружение ветроустановок в морских условиях значительно сложнее, чем на суше, из-за распространения рыхлых и пластичных донных осадков. На шельфе арктических морей эти осадки могут быть мерзлыми льдистыми. Эти природные и технические особенности дают основание считать шельфы северо-восточных морей бесперспективными для освоения ветроэнергетического потенциала в предстоящие десятилетия.

Энергию солнечного излучения наиболее рационально использовать для генерации электричества во внутриконтинентальных районах, удаленных от моря на расстояния более 50 км, т. е. значительная часть площади внутриконтинентальной части КрСВ РФ, которая составляет примерно 90 % общей региональной, т. е. 1.35 млн км². Для теоретической оценки принята средняя годовая сумма солнечной радиации 3500 МДж/м² (таблица 1), соответствующая 973 кВт·ч/м². На 1 км² излучение составит $973 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (для справки: в Москве этот показатель равен 3694 МДж/м², или 1027 кВт·ч/м²) (Хромов, Петросянц, 2006).

Как отмечено выше, в условиях КрСВ РФ более 80 % солнечной инсоляции приходится на период с апреля по сентябрь. Поэтому для расчета выработки электроэнергии принята указанная годовая сумма, сокращенная на 15 %, т. е. реальная средняя годовая суммарная величина солнечного излучения составит 3018 МДж/м², или 839 кВт/м². Тогда вся площадь внутриконтинентальных районов, около 1.35 млн км², обеспечи-

вает мощность солнечных электростанций примерно в $1132 \cdot 10^{12} \text{ кВт}$, или $1132 \cdot 10^9 \text{ МВт}$. Так как площади, перспективные для размещения солнечных батарей, составляют около 25 % от общей площади региона, суммарную мощность СЭС можно оценить в $283 \cdot 10^{12} \text{ МВт}$, что обеспечивает годовую выработку в $2479 \cdot 10^{12} \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ электроэнергии.

В настоящее время солнечную инсоляцию используют для получения электроэнергии в 15 населенных пунктах Республики Саха (Якутии), тем самым экономя расходы дизтоплива на поселковых дизельных электростанциях. Наиболее крупная из СЭС работает с 2015 г. в пос. Батагай, расположенном за Полярным кругом (67° 40' с. ш.). Эта электростанция мощностью в 1 МВт внесена в книгу рекордов Гиннеса как самая крупная в мире заполярная СЭС. Площадь солнечных панелей, изготовленных в Китае, составила 3.8 га (В поселке..., 2015; Александрова, 2022). Для сравнения: крупнейшие солнечные электростанции мира, использующие однотипные панели, имеют мощность от 802 до 2200 МВт. Расположены они в пустынных и полупустынных районах, в низких широтах и занимают площадь для размещения панелей от 1600 до 5200 га (Крупнейшие..., 2022). Приняв отношение этой площади к мощности СЭС, мы получим удельную площадь конкретной станции. Данный показатель СЭС в пос. Батагай 3.8 га/МВт, у крупнейших – от 2 до 5.9 га/МВт. При этом солнечная инсоляция в пунктах крупнейших СЭС в 2 и более раза больше, чем в заполярной тундре. Примем во внимание, что на КрСВ РФ это излучение поступает примерно полгода. Следовательно, солнечные панели в высоких северных широтах работают на 50 % эффективнее, чем в жарких южных пустынях и полупустынях. По мнению автора, на КПД панелей в южных пустынных районах негативно сказывается не только более высокая летняя темпе-

ратура воздуха и меньшая его влажность, но и наличие в воздухе пустыни тонких частиц пыли, преобразующих наиболее энергоактивные части солнечного спектра в менее активное инфракрасное излучение. Этой пыли нет в воздухе арктических и субарктических тундр.

Подчеркнем, что климатические условия внутриконтинентальных районов КрСВ РФ благоприятны для эффективной работы солнечных электростанций с апреля по сентябрь.

Для примера по топографическим картам листа Р-57 мы выявили в бассейне верхнего течения р. Сугой выположенные водоразделы общей площадью около 300 км² (30000 га). По аналогии с СЭС пос. Батагай считаем, что мощность в 1 МВт обеспечат солнечные батареи площадью 3.8 га. Соответственно, на площади в 30000 га можно разместить панели СЭС мощностью около 7900 МВт. Реально данный район находится на 5° с. ш. южнее пос. Батагай, поэтому мощность в 1 МВт, наиболее вероятно, будет получена на площади около 2.5 га. Соответственно, мощность СЭС составит 12000–15000 МВт, т. е. в 12–15 раз больше, чем мощность Колымской ГЭС. Годовую выработку оцениваем в $(32\text{--}40) \cdot 10^9$ кВт·ч.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫРАБОТКИ ВОДОРОДА

При оценке возможного уровня производства водорода мы учитывали как расход электроэнергии, так и расход пресной воды, затрачиваемой на получение водорода по современным нормам.

Наиболее перспективными для электролиза воды считаются электролизеры с твердым полимерным покрытием. При этом затраты электроэнергии на производство 1 м³ водорода составят 3.5–4.5 кВт·ч. Примем 4 кВт·ч/м³H₂. Вес 1 м³ водорода 89.8 г, т. е. 1 кг его занимает объемом 11.14 м³, на производство которого нужно затратить 44.6 кВт·ч, соответственно на получение 1 т H₂ нужно $44.6 \cdot 10^3$ кВт·ч. При этом процессе

для производства 1 т H₂ необходимо 9 т (м³) деионизированной воды (Григорьев и др. 2008; Дубинин и др., 2009; Соловьев, 2020). Так как вода горных водотоков и гидравлически связанные с ними подземные воды имеют очень малую минерализацию, их можно использовать для электролиза без предварительных затрат электроэнергии на деионизацию.

С учетом приведенных показателей электролиза в таблице 4 приведены данные о затратах электроэнергии и воды при возможном производстве водорода на КрСВ РФ.

Разумеется, полученные сведения отражают теоретически возможные масштабы производства водорода и затраты воды. Последний показатель в 4.2 раза превышает среднегодовой сток рек в моря, омывающие КрСВ РФ. Согласно разработкам ООН по водным ресурсам, считается нормальным, если водопотребители используют менее 10 % стока реки. Поэтому перспективы региона на выработку водорода нужно оценивать не масштабами генерации электроэнергии, а количеством возможного изъятия воды, которое в условиях региона не должно превышать объема 18 млрд м³. Это обеспечит производство водорода в объеме 2 млрд т, соответственно 1.28 млрд т за счет солнечной энергии и 0.72 млрд т за счет энергии ветра.

На приведенной выше СЭС в пределах водосбора в верховье р. Сугой можно производить за год электроэнергию около $40 \cdot 10^9$ кВт·ч. Используя её, можно будет получить около 1 млн т водорода, затратив 9 млн м³ воды (0.285 м³/с). Потребность в воде будет обеспечивать круглогодичный сток в верхнем течении реки в створе в 3.2 км ниже устья р. Омчикчан. Минимальный суточный сток за 40 лет наблюдений здесь в апреле 8 раз был ниже указанного возможного водопотребления. Необходимый среднемесячный расход в реке наблюдается в период с мая по декабрь. Следовательно, и в данном районе во-

Таблица 4. Возможное производство водорода на перспективных площадях при использовании климатических возобновляемых источников энергии

Table 4. Possible production of hydrogen in promising areas using climatic renewable energy sources

№№ п/п	Возможные источники энергии и места их расположения	Годовая выработка электроэнергии, кВт·ч	Производство водорода, т	Затраты воды, м ³ ·т
<i>1. Энергия ветра</i>				
1	Побережье арктических морей	$333.5 \cdot 10^{12}$	$7.5 \cdot 10^9$	$67.5 \cdot 10^9$
2	Побережье Берингова моря	$519 \cdot 10^{12}$	$11.6 \cdot 10^9$	$104.6 \cdot 10^9$
3	Побережье Охотского моря	$508 \cdot 10^{12}$	$11.3 \cdot 10^9$	$101.3 \cdot 10^9$
	Всего	$1360.5 \cdot 10^{12}$	$30.4 \cdot 10^9$	$274.4 \cdot 10^9$
<i>2. Солнечная инсоляция</i>				
1	Внутриконтинентальные районы с выположенными водоразделами	$2409 \cdot 10^{12}$	$54 \cdot 10^9$	$486 \cdot 10^9$
	Итого	$3769 \cdot 10^9$	$84.4 \cdot 10^9$	$760.4 \cdot 10^9$

доснабжение предприятия по производству водорода без устройства водохранилища имеет сезонный характер. В других районах такая сезонность выражена еще более резко. Наиболее острый дефицит воды возникает на побережьях арктических морей (Готов, Готова, 2015). Это обстоятельство, а также очень суровые климатические условия делают неизбежным сезонный характер работ по производству «зеленого» водорода.

Мы предлагаем получение водорода осуществлять в теплое время года, используя опыт работ по добыче россыпного золота, сельскохозяйственных работ, рыболовства в арктических и субарктических морях и т. д. Разумеется, это предложение относится только к производству водорода. Например, ветровые электростанции в районе крупных населенных пунктов будут вырабатывать электроэнергию для обогрева крупных теплиц, производственных и жилых помещений и т. д. Допускаем, что в холодный период года будет экономически выгодно производить и транспортировать аммиак, используя естественный холод зимней атмосферы. В целом, связанные со становлением водородной энергетики, вопросы экономики, аккумуляции и хранения выработанного водорода, его транспортировки и использования нуждаются в дополнительных исследованиях. Однако выполненная работа показывает, что внутриконтинентальные арктические и субарктические районы Крайнего Северо-Востока, а возможно, и всей Восточной Сибири весьма перспективны для производства «зеленого» водорода с использованием энергии солнечного излучения и ветра и ресурсов маломинерализованных поверхностных и подземных вод.

ВЫВОДЫ

В целом из содержания изложенной статьи следует:

1. Климатические возобновляемые источники энергии на Крайнем Северо-Востоке России могут служить основой для производства «зеленого» водорода в любых необходимых количествах, контролируемого только ресурсами ультрапресной природной воды. С учетом существующих инженерно-геологических и экологических ситуаций, расходуя не более 10 % объема стока ультрапресных вод в моря, омывающих регион, возможно получение $2 \cdot 10^9$ т водорода, в том числе 1.28 млрд т за счет использования энергии Солнца. Уже сейчас целесообразно строительство солнечной электростанции в верхнем течении р. Сугой с производством около 1 млн т водорода в год.

2. В современных климатических и орографических условиях климатические возобновляемые источники энергии в пределах КрСВ РФ отличаются зональностью распространения – на морских побережьях наиболее эффективны ве-

тровые источники, во внутриконтинентальных – солнечные и вертикальной высотной поясности. Последняя проявляется в том, что энергетические показатели скорости ветра и, вероятно, солнечной радиации на водоразделах больше, чем в долинах.

3. Выяснено, что выположенные и выровненные водоразделы с примитивными почвами на щебнисто-дресвяном элювиально-делювиальном слое мощностью до 1.5 м являются своеобразным природным ресурсом, наиболее экологически рациональным для устройства ветро- и солнечных электростанций при расположении производств электролиза воды в речных долинах.

4. Работы по генерации водорода будут носить сезонный характер, вызываемый прежде всего зимним дефицитом пресной воды для электролиза и сезонностью климатических условий эксплуатации электростанций.

5. Необходимо обратить внимание геологов и географов на картирование выположенных и плоских водоразделов, как перспективного природного ресурса в горных регионах криолитозоны для размещения ветровых и солнечных электростанций.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность Готовой Людмиле Петровне за помощь в подборке материалов и подготовке работы к публикации.

ЛИТЕРАТУРА

- Александрова Д. Экологичность и экономичность: в районах Якутии работают 22 солнечные электростанции // Улус Медиа. 13.12.2022.
- 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.
- Вольф Г. Водородная надежда. 2021. URL: [Retok.ru/articles/freezone/23899/](https://retok.ru/articles/freezone/23899/) (дата обращения 23.06.2023).
- В поселке Батагай в Якутии открыта крупнейшая за Полярным кругом в мире солнечная электростанция. 2015. URL: marinychev.sakha.gov.ru (дата обращения 23.06.2023).
- Гидрогеология СССР. Т. 26. Северо-Восток СССР / Ред. О. Н. Толстихин. Москва : Недра, 1972. 297 с.
- Готов В. Е., Готова Л. П. Гидрогеология зоны активного водообмена на арктическом побережье Севера Дальнего Востока // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2015. № 1. С. 28–36.
- Гольдтман В. Г. Мерзлая зона // Гидрогеология СССР. Т. 26. Северо-Восток СССР. Москва : Недра, 1972. С. 59–64.
- 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.

- Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. Москва : МГУ, 1982. 192 с.
- Долинская Е. М., Яковенко Е. М. Перспективы развития возобновляемых источников энергии в территориальном планировании Магаданской области // *Universum: технические науки : Электронный научный журнал*. 2021. № 8 (89). URL: <https://Tunivsum.com/ru/tech/archive/item/11224> (дата обращения 05.05.2023).
- Дубинин А. М., Кагарманов Г. Р., Финк А. В. Энергетическая эффективность ряда способов получения водорода // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2009. Т. 52, № 2. С. 54–56.
- Дудов Н. Н., Глотов В. Е., Горячев Н. А. Оценка ресурсной базы устойчивого развития Северо-Востока в XXI веке // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2008. № 3. С. 2–14.
- Ермоленко Б., Ермоленко Г., Проскуракова Л. Насколько высок технологически реализуемый потенциал ВИЭ в России // *ТЭК России*. 2017. № 3. С. 22–27.
- Зайченко В. М., Крылова А. Ю., Чернявский А. А. О «лишней» электроэнергии в Магаданской области // *Энергетическая политика*. 2020. № 3 (45). С. 46–53.
- Инженерная геология СССР*. Т. 4. Дальний Восток / Под ред. Е. Г. Чаповского. Москва : МГУ, 1977. 502 с.
- Клюкин Н. К. Климат // *Север Дальнего Востока*. Москва : Наука, 1970. С. 101–132.
- Клюкин Н. К. Характеристики климатических условий сезонов года // *Прикладной климатологический справочник Северо-Востока СССР* / Под ред. Н. К. Клюкина. Магадан : Кн. изд-во, 1960. 427 с.
- Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 № 2162-р). Москва : Кодекс, 2021.
- Крупнейшие солнечные электростанции в мире. 2022. URL: enovi.ru/krupnejshie-solnechnye-elektrostantsii-v-mire (дата обращения 13.07.2023).
- Мингалеева Р. Д., Зайцев В. С., Бессель В. В. Оценка технического потенциала ветровой и солнечной энергетики России // *Территория «Нефтегаз»*. 2014. № 3. С. 84–92.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 17. Бассейны Колымы и рек Магаданской области. Ленинград : Гидрометеоздат, 1985. 429 с.
- Мытарева А. Ю., Глотов В. Е. Общие закономерности распространения, режима и изменения химического состава подземных вод // *Инженерная геология СССР*. Т. 4. Дальний Восток / Под ред. Е. Г. Чаповского. Москва : МГУ, 1977. С. 63–78.
- Научно-прикладной справочник «Климат России». 2022. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climspn/> (дата обращения 05.05.2023).
- Осокин В. Л., Семенов Д. А., Дулепов Д. Е., Сбитнев Е. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники электрической энергии. Княгино : Нижегородский инженерно-экономический университет, 2019. 128 с.
- Польчевская Е. С., Куимова М. В. О преимуществах и недостатках ветроэлектростанций // *Молодой ученый*. 2015. № 9 (89). С. 479–480.
- Раковская Э. М., Давыдова М. И. Физическая география России : в 2 ч. Ч. 2. Азиатская часть. Кавказ. Урал. Москва : ВЛАДОС, 2002. 304 с.
- Соколовский Ю. А. Оценка и использование естественных ресурсов // *Север Дальнего Востока* / Ред. Н. А. Шило. Москва : Наука, 1970. С. 378–396.
- Соловьев Д. А. Направления развития водородных энергетических технологий // *Энергетическая политика*. 2020. № 3 (145). С. 64–71.
- Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климат. Москва : МГУ, 2006. 582 с.
- Шафиев Д. Р., Трапезников А. Н., Хохонов А. А., Агарков Д. А., Бредихин С. И., Чечиров А. А., Субчева Е. Н. Методы получения водорода в промышленном масштабе. Сравнительный анализ // *Успехи в химии и химической технологии*. Т. XXXV. 2020. № 12. С. 53–57.
- Шевченко М. В. Современные ветроэлектростанции и особенности их конструкций // *Вестник Камчатского ГТУ*. 2006. № 5. С. 59–64.
- Шепелев В. В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск : ГЕО, 2011. 169 с.

Поступила в редакцию 18.08.2023.

Поступила после доработки 07.09.2023.

RUSSIA'S FAR NORTH-EAST PROSPECTS FOR "GREEN" HYDROGEN PRODUCTION USING CLIMATIC SOURCES OF RENEWABLE ENERGY

V. E. Glotov

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

For the first time, Russia's Far North-East prospects for hydrogen production by the method of water electrolysis, using climatic energy sources and ultra-fresh mountain-river water, are comprehensively assessed. Taking into account the identified regional features, it is calculated

that, with the current technical level of development, the amount of hydrogen produced in the region will be controlled just by the amount of used sultra-fresh mountain-river water. Thus, using no more than 10 percent of the general runoff (18 billion m³ water), it is possible to annually obtain 2×10^9 tons of “green” hydrogen through the operation of wind and solar power plants. To accommodate the latter, it is ecologically feasible to use the areas in mountain tundras and forest-tundras on flattened and flat watersheds.

Keywords: Russia’s Far North-East, “green” hydrogen, renewable energy sources, wind-mill generators, solar stations, water resources, flattened lowlands.

REFERENCES

- Alexandrova, D., 2022. Environmental Friendliness and Efficiency: 22 Solar Stations Operate in Yakutia’s Districts // *Ulus Media*. 13.12.2022 [In Russian].
- Borevsky, B. V., Garayeva, T. V., Zubanova, T. N., Kurennoy, V. V., 2013. Map of the Fresh Groundwater Resource Potential. Scale 1:5,000,000. Ed. B. V. Borevsky. Moscow, GIDEK [In Russian].
- Climate of Russia: Scientific and Applied Reference Book, 2022. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/> (accessed 05.05.2023) [In Russian].
- Concept for the Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation, 2021. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation, August 05, 2021, No. 2162-r. Moscow, Codex [In Russian].
- Dobrovolsky, A. D., Zalogin, B. S., 1982. Seas of the USSR. Moscow, MSU [In Russian].
- Dolinskaya, I. M., Yakovenko, Ye. M., 2021. Prospects for Renewable Energy Sources Development in the Magadan Oblast Territorial Planning, *Universum: Technical Sciences : Electronic Scientific Journal*. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/112204> (accessed 05.05.2023) [In Russian].
- Dubin, A. M., Kagarmanov, G. R., Fink, A. V., 2009. Energy Efficiency of Some Methods for Producing Hydrogen, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 52 (2), 54–56 [In Russian].
- Dudov, N. N., Glotov, V. E., Goryachev, N. A., 2008. Assessment of the Resource Base for Sustainable Development of the Northeast in the 21st Century, *Bulletin NESCFEB RAS*. 3, 2–14 [In Russian].
- Engineering Geology of the USSR, 1977. Vol. 4. Far East. Ed. E. G. Chapovsky. Moscow, MSU [In Russian].
- Glotov, V. E., Glotova, L. P., 2015. Hydrogeology of the Active Water Exchange Zone on the Arctic Coast in the North of the Far East, *Bulletin NESCFEB RAS*. 1, 28–36 [In Russian].
- Goldman, V. G. Frozen Zone, *Hydrogeology of the USSR*. Vol. 26. North-East of the USSR. Moscow, Nedra, 59–64 [In Russian].
- Grigoryev, S. A., Porembsky, V. I., Fateyev, V. M., Samsonov, R. O., Kozlov, S. I., 2008. Hydrogen Production by Water Electrolysis : Current State, Problems, and Prospects, *Alternative Fuel Transport*. 3, 62–69 [In Russian].
- Hydrogeology of the USSR, 1972. Vol. 26. Northeast of the USSR. Ed. H. E. Tolstikhin. Moscow, Nedra [In Russian].
- In the Settlement of Batagay in Yakutia, the World’s Largest Solar Station Was Opened beyond the Arctic Circle, 2015. URL: marinychev.sakha.gov.ru (accessed 23.06.2023) [In Russian].
- Khromov, S. P., Petrosyants, M. A., 2006. Meteorology and Climate. Moscow, MSU [In Russian].
- Klyukin, N. K., 1960. Characteristics of the Climatic Conditions for the Year Seasons, *Applied Climatological Reference Book for the North-East of the USSR*. Ed. N. K. Klyukin. Magadan [In Russian].
- Klyukin, N. K., 1970. Climate, *North of the Far East*. Moscow, Nauka, 101–132 [In Russian].
- Long-Term Data on the Regime and Resources of Surface Waters on Land, 1985. Vol. 1. Iss. 17. Basins of the Kolyma and the Rivers of Magadan Oblast. Leningrad, Gidrometeoizdat [In Russian].
- Mingaleeva, R. D., Zaytsev, V. S., Bessel, V. V., 2014. Assessment of the Technical Potential for Wind and Solar Energy in Russia, *Territoriya Neftegaz*. 3, 84–92 [In Russian].
- Mytareva, A. Yu., Glotov, V. E. General Patterns of Distribution, Regime, and Changes in the Chemical Composition of Groundwater, 1977, *Engineering Geology of the USSR. Vol. 4. Far East*. Ed. E. G. Chapovsky. Moscow, MSU, 63–78 [In Russian].
- Osokin, V. L., Semyonov, D. A., Dulepov, D. E., Shitnev, E. A., 2019. Non-Traditional and Renewable Sources of Electrical Energy. Knyagino, Nizhny Novgorod Engineering and Economic University [In Russian].
- Polchevskaya, E. S., Kuimova, M. V., 2015. On Advantages and Disadvantages of Wind Power Plants, *Molodoy Uchyony*. 9 (89), 479–480 [In Russian].
- Rakovskaya, E. M., Davydova, M. I., 2002. Physical Geography of Russia. Textbook for Universities. Asian Part. Caucasus. Urals. Moscow, VLADOS [In Russian].
- Shafiyev, D. R., Trapeznikov, A. N., Khokhonov, A. A., Agarkov, D. A., Bredikhin, S. I., Chechirov, A. A., Subcheva, E. N., 2020. Methods for Producing Hydrogen in the Industrial Amounts. Comparative Analysis, *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. XXXV, 12, 53–57 [In Russian].
- Shepelev, V. V., 2011. Supra-Permafrost Waters in the Permafrost Zone. Novosibirsk, GEO [In Russian].

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

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

Solovyov, D. A., 2020. Directions of the Development of Hydrogen Energy Technologies, *Energy Policy*. 3 (145), 64–71 [In Russian].

Largest Solar Power Station in the World, 2022. URL: enovi.ru/krupnejshie-solnechnye-elektrostantsii-v-mire (accessed 13.07.2023) [In Russian].

Wolf, G. Hydrogen Hope. URL: [Peretok.ru/articles / freezone/23899/](https://peretok.ru/articles/freezone/23899/) (accessed 23.06.2023) [In Russian].

Yermolenko, B., Yermolenko, G., Proskuryakova, L., 2017. How High is the Technologically Realizable Potential of RES in Russia, *TEK Rossiya*. 3, 22–27 [In Russian].

Zaychenko, V. M., Krylova, A. Yu., Chernyavsky, A. A., 2020. On the “Surplus” Electricity in Magadan Oblast, *Energy Policy*. 3 (45), 46–53 [In Russian].