

УДК 620.92

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА СЕВЕРЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

© 2025 г. М.Ю. Березкин, К.С. Дегтярев*, О.А. Синюгин

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова***E-mail: kir1111@rambler.ru*

Поступила в редакцию 09.04.2025 г.

После доработки 17.07.2025 г.

Принята к публикации 24.07.2025 г.

В статье проводится оценка объемов и структуры местных возобновляемых энергетических ресурсов северных районов Красноярского края, отличающихся экстремальными природными условиями, низкой плотностью населения и изоляцией от магистральных линий электропередач. Это территория к северу от Ангары, основная часть которой приходится на Таймырский Долгано-Ненецкий, Эвенкийский и Туруханский районы. Электроэнергия в данных районах производится на дорогостоящем привозном ископаемом топливе, и актуальной задачей является оценка возможностей его замещения за счет местных возобновляемых энергоресурсов — солнечной, ветровой, гидро- и биоэнергии. В статье проводится исследование потенциала данных источников, проводится дифференциация территории с точки зрения их объема и территориального распределения. В пределах исследуемой территории выделены две зоны. В северной зоне, Таймырской, предпочтительнее развитие ветроэнергетики, в том числе строительство крупных ветроэлектростанций. В южной, представленной Эвенкийским, Туруханским и прилегающими к ним районами, перспективна малая автономная диверсифицированная энергетика, представленная солнечными электростанциями, гидроэлектростанциями и биоэнергетическими станциями. Таймыр — территория, привязанная к Северному морскому пути и Норильскому промышленному району. Таким образом, территория между ним и экономически развитым югом Красноярского края становится своего рода обширным природным хинтерландом. Полное замещение привозного топлива местными ресурсами невозможно из-за нестабильности возобновляемых источников, однако постепенное наращивание их доли в рамках гибридных энергетических комплексов эффективно. Экономия дизельного топлива составляет 0.3–0.8 т в год, а сокращение выбросов CO₂ — 1–2 т в год на каждый 1 кВт установленной мощности солнечной или ветровой электростанции. Срок окупаемости единицы установленной мощности на основе возобновляемых источников составит 3–4 года, а снижение внешних издержек дает дополнительный экономический эффект.

Ключевые слова: Красноярский край, Таймырский район, Эвенкийский район, возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, ветроэнергетика, гидроэнергетика, биоэнергетика, экономика возобновляемой энергетики, энергоснабжение

DOI: 10.31857/S0869607125030085, EDN: LTWNJC

Введение

Красноярский край является вторым по площади (после Республики Саха—Якутия) субъектом Российской Федерации — площадью почти 2.4 млн км², и самым

вытянутым с севера на юг, протяженность — 2800 км. В связи с этим он отличается контрастностью природных и хозяйственных условий между его разными частями. Крайний юг Красноярского края находится в зоне лесостепей, крайний север — в зоне арктических пустынь. С определенной долей условности Красноярский край можно разделить на две части — к северу и к югу от Ангары (рис. 1). Природные условия к северу от Ангары позволили часть административно-территориальных единиц края отнести к районам Крайнего Севера и к районам, приравненным к Крайнему Северу¹.

С точки зрения энергетики и особенности экономики этой территории отдельное место занимает изолированный Норильско-Таймырский энергорайон, снабжающий энергией Норильский промышленный район и единое муниципальное образование “город Норильск” (с населением 176.7 тыс. чел., 2024 г.). В энергорайон входят 3 ТЭЦ общей мощностью 1280 МВт, и 2 ГЭС — Усть-Хантайская (510 МВт) и Курейская (600 МВт).

На остальную территорию севера приходится 89.3% площади Красноярского края и всего 5.8% населения. В постсоветское время эти районы пережили депопуляцию, особенно резкую в районах Крайнего Севера, с почти двукратным сокращением численности населения (табл. 1).

Почти половина из 62 тыс. населения четырех районов Крайнего Севера приходится на городские поселения: Дудинку (19 тыс.), Северо-Енисейский (6 тыс.),

Таблица 1. Административные районы Красноярского края, относящиеся к районам Крайнего Севера и районы, приравненные к ним²

Table 1. Administrative districts of Krasnoyarsk Territory belonging to the regions of the Far North and areas equated to them

Районы	Площадь, тыс. км ²	Численность населения, тыс. чел.	
		1989	2024
<i>Районы Крайнего Севера</i>			
Таймырский Долгано-Ненецкий (без м/о “город Норильск”)	880	55.1	29.6
Эвенкийский	763	19.3	13.4
Туруханский	211	24.4	12.8
Северо-Енисейский	47	17.1	6.2
<i>Районы, приравненные к Крайнему Северу</i>			
Енисейский	106	22.4	22.6
Мотыгинский	18	26.6	13.6
Богучанский	54	58.2	45.3
Кежемский	34	31.2	20.3
Всего	2113	254.3	163.8

¹ https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_400590/ff45085b4795fe7104ea14fdb9943bcb46be3a59/ (дата обращения: 02.04.2025).

² <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 02.04.2025).

Туруханск (3 тыс.), Туру (4 тыс.) и Игарку (3 тыс.). Эвенкийский и Таймырский районы — одни из самых редконаселенных территорий России (средняя плотность населения, соответственно, 0,018 и 0,034 чел./км²).

Северные районы Красноярского края находятся в зоне экстремальных природных и хозяйственных условий с резко континентальным климатом, сплошным распространением многолетней мерзлоты, отсутствием сети железных и автомобильных дорог (за исключением железной дороги, связывающей Норильск с Дудинкой), удаленностью от экономических центров — в частности, расстояние от ближайшего относительно крупного города Красноярского края — Енисейска (17,5 тыс. чел.), являющегося конечным пунктом краевой автодороги “Енисейский край”, до Туруханска составляет по прямой 850 км.

Большая часть территорий районов находится в зоне децентрализованного энергоснабжения — вне магистральных линий электропередач, без связи с Единой энергосистемой России, и практически полностью зависит от завоза энергоносителей (уголь, мазут) извне. В связи с этим, представляется актуальным исследование возможностей надежного и недорогого энергоснабжения населения районов за счет местных энергетических ресурсов, включая ВИЭ.

Энергетические ресурсы Красноярского края

В целом Красноярский край отличается большими энергетическими ресурсами, прежде всего — крупные месторождения угля (Канско-Ачинский и Тунгусский бассейны) и гидроэнергетические ресурсы, связанные с крупнейшими реками (Енисей, Ангара, Нижняя Тунгуска, Подкаменная Тунгуска) и их притоками, протекающие на значительном протяжении по горным и предгорным территориям с большими уклонами, что создает повышенный энергетический потенциал.

Как следствие, Красноярский край является одним из крупнейших в России производителей электроэнергии. В настоящее время на территории края работает 18 тепловых электростанций и 5 гидроэлектростанций общей мощностью более 18 ГВт, в том числе 6 ГВт приходится на Красноярскую ГЭС, входящую в крупнейший в России Енисейский гидроэнергетический каскад¹. В совокупном объеме выработки электроэнергии доля на гидроэлектростанциях и тепловых угольных электростанциях примерно равна. По объему производства электроэнергии — около 67,4 ТВт ч в год² — Красноярский энергетический комплекс занимает второе место в России (более 6% всего производства электроэнергии в стране).

Между тем общая протяженность линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше — 18 485 км, в том числе 500 кВ — 2889 км, 220 кВ — 5529 км, 110 кВ — 10 067 км. В среднем плотность распределения линий электропередач в регионе составляет 150 чел./км ЛЭП, тогда как в среднем по России этот показатель в два раза больше — 300 чел./км. Низкая плотность охвата генерирующими станциями говорит о более высоких рисках для устойчивого энергоснабжения населения и промышленных предприятий.

Кроме того, Красноярский край отличается большим объемом лесных ресурсов. По объемам лесозаготовок — 18–25 млн м³ в год³, или около 10% от всего

¹ <https://energybase.ru/region/krasnoyarskij-kraj/power-plants> (дата обращения: 02.04.2025).

² https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b10_48/IssWWW.exe/Stg/d01/06-168.htm (дата обращения: 02.04.2025).

³ https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения: 02.04.2025).

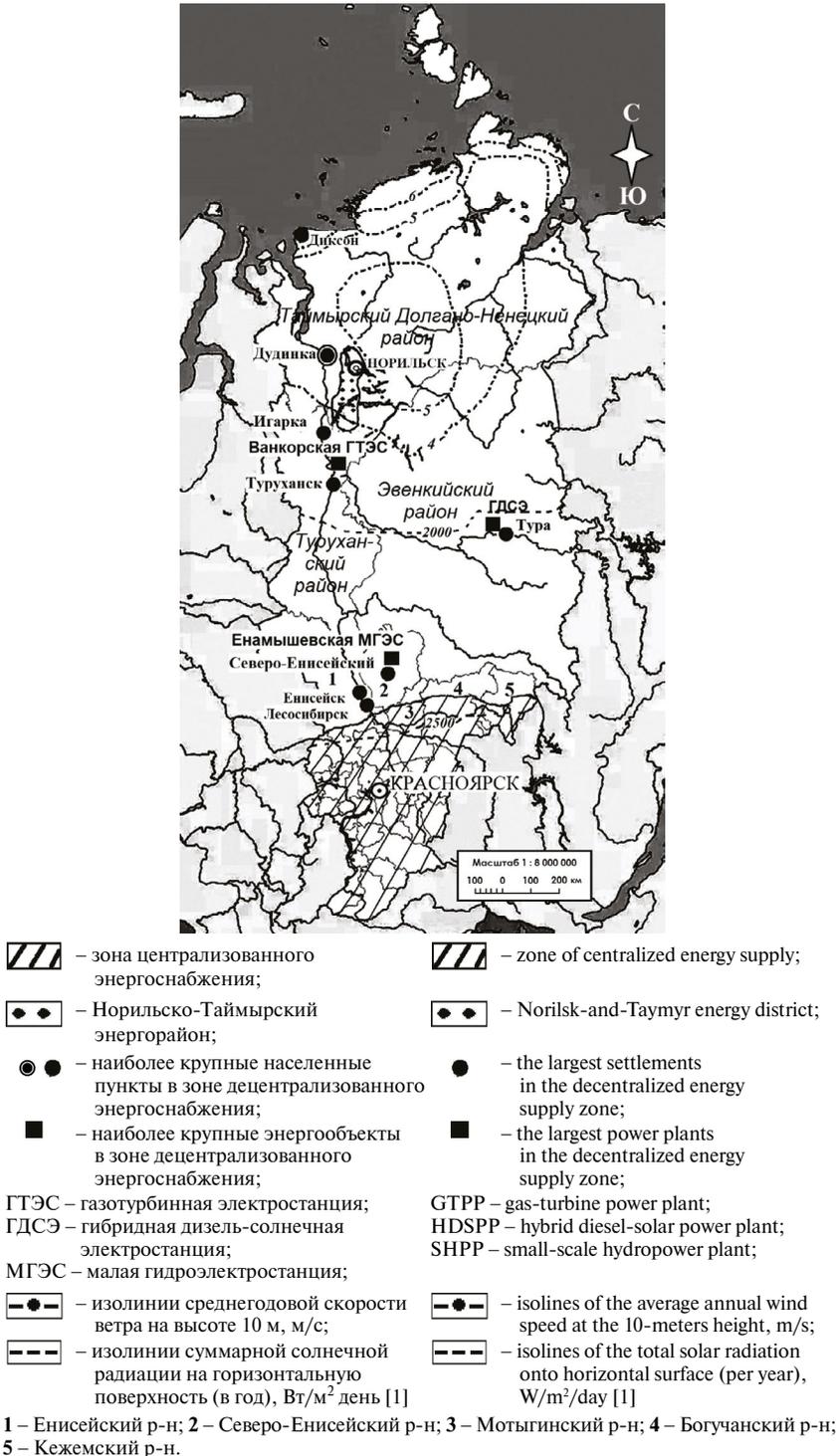


Рис. 1. Картограмма районов Красноярского края (составлено авторами).

Fig. 1. Cartography of the districts of the Krasnoyarsk Territory (compiled by the authors).

российского объема, край занимает второе место в России после соседней с ним Иркутской области. Объем образующихся при этом древесных отходов, которые можно использовать в энергетических целях, согласно имеющимся методикам оценок в российских [2, 3, 4, 5] и зарубежных⁴ источниках, может быть оценен в величину порядка 2 млн т. Как следствие, Красноярский край становится одним из центров производства древесных топливных гранул — пеллет⁵; в частности, на базе местного лесоперерабатывающего и лесохимического комплекса созданы производства топливных гранул в Лесосибирске (Енисейский район, 40 тыс. т в год), Кодинске (Кежемский район, 25 тыс. т в год), Красноярске (50 тыс. т в год), Березовском районе (50 тыс. т в год); планируется расширение имеющихся и создание новых мощностей.

В то же время развитый и диверсифицированный энергетический комплекс сосредоточен полностью в южных районах края. На севере энергоснабжение осуществляется за счет внешних поставок ископаемого топлива. Речь идет о территории, занимающей девять десятых площади края — главным образом, Таймырский, Эвенкийский и Туруханский районы, а также части территорий Енисейского, Северо-Енисейского, Мотыгинского, Богучанского и Кежемского районов. Например, в Эвенкийском р-не все 23 населенных пункта зависят от завоза топлива и относятся к децентрализованной энергосистеме, в самом северном — Таймырском Долгано-Ненецком муниципальном районе таких 21 из 27, а всего в Красноярском крае — 95, в которых проживает 37 тыс. чел. (табл. 2).

Единственным крупным энергообъектом на данной территории является Ванкорская ГТЭС (206 МВт) — газотурбинная тепловая электростанция (ГТУ-ГЭЦ), расположенная в Туруханском районе. Она является основным источником электро- и теплоснабжения объектов Ванкорского нефтегазового месторождения.

Из объектов генерации на основе ВИЭ наиболее крупные — Енамышевская МГЭС (Северо-Енисейский район, 5,4 МВт) и солнечная электростанция (2,5 МВт) в составе автономной гибридной дизель-солнечная электростанции (ГДСЭ) в пос. Тура (Эвенкийский район, общая мощность 14,1 МВт)⁶, пущенную в эксплуатацию в 2023 г., можно рассматривать как продолжение успешного опыта строительства и эксплуатации дизель-солнечных комплексов в соседней Республике Саха—Якутия, начиная с 2010-х гг. [6, 7].

Основные из известных на данный момент энергетических ресурсов территории — уголь крупнейшего в России Тунгусского бассейна [8], лесные и гидроэнергетические ресурсы. Однако разведка и освоение сталкиваются с экстремальными природными условиями и удаленностью территории.

Существовал проект создания Эвенкийской ГЭС [9] на реке Нижняя Тунгуска мощностью 8–12 ГВт (в случае реализации ГЭС стала бы крупнейшей в России и одной из крупнейших в мире), однако он был заморожен из-за протестов экологов, местных жителей и высокой стоимости⁷.

⁴ <https://www.aap.com.au/factcheck/does-europes-renewable-energy-mostly-come-from-burning-wood/#:~:text=Detailed%20figures%20from%20Eurostat%20show%20renewable%20energy%20accounted%20for%209.6%20per%20cent%20of%20the%20renewable%20electricity%20total> (дата обращения: 02.04.2025).

⁵ <https://www.infobio.ru/news/5399.html>, <https://lpk-sibiri.ru/bioenergetics/pellet-plants/razvitie-proizvodstva-pellet-v-krasnoyarskom-kraye/> (дата обращения: 02.04.2025).

⁶ <https://dela.ru/news/278897/> (дата обращения: 02.04.2025).

⁷ <https://ecodelo.org/boguchanskayaGES> (дата обращения: 02.04.2025).

Таблица 2. Количество населенных пунктов и населения в зоне децентрализованного энергоснабжения**Table 2.** Quantity of settlements and population in the decentralized energy supply zone

Районы	Кол-во населенных пунктов	Кол-во населения, тыс. чел.	Доля от всего населения этих районов, %
Таймырский Долгано-Ненецкий (без м/о “город Норильск” и г. Дудинка)	21	7.13	94.2
Эвенкийский	23	13.33	100.0
Туруханский	25	9.86	77.1
Северо-Енисейский	1	0.12	2.0
Енисейский	16	5.23	23.0
Мотыгинский	2	0.11	0.8
Богучанский	4	0.41	0.9
Кежемский	3	0.82	3.9
Всего	95	37.01	22.8

Лесные ресурсы существенно беднее, чем в южной части Красноярского края. Большая часть Туруханского района, Эвенкийский район и юго-западная часть Таймырского района лежат в подзоне северной тайги, представленной, главным образом, лиственницей, остальная часть Таймырского района — в зоне тундры⁸. В то же время лесные ресурсы Туруханского и Эвенкийского районов могут быть достаточными для энергообеспечения на местном уровне. В Туруханском и Эвенкийском районе дрова используются в качестве топлива; кроме того, локально ведутся промышленные лесозаготовки⁹, что создает базу для производства и древесных пеллет.

Также проводились исследования ветроэнергетических ресурсов Красноярского края [10]. Было выявлено несколько ветровых зон. Максимальным ветроэнергетическим потенциалом отличается Таймырский район, где среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м почти повсеместно превышают 5 м/с, а в его северо-западной части, на побережье Енисейского залива — 6 м/с. Авторами были проведены расчеты экономической эффективности ветроэнергетических комплексов в условиях Таймыра и показано, что стоимость ветровой электроэнергии существенно ниже по сравнению с дизельным топливом, а сроки окупаемости ветроэнергетических комплексов должны составить, в зависимости от используемого оборудования и типа потребления, от 1.6 до 7.6 года.

В Туруханском и Эвенкийском районах, равно как и на остальной территории Красноярского края, ветроэнергетические ресурсы существенно меньше — средние скорости ветра на большей части территории 3–4 м/с, в отдельных районах, главным образом, вдоль Енисея — до 5 м/с.

⁸ <https://nationalatlas.ru/tom2/331.html> (дата обращения: 02.04.2025).

⁹ https://evenkiya-r04.gosweb.gosuslugi.ru/dlya-zhiteley/novosti-i-reportazhi/novosti_390.html (дата обращения: 02.04.2025).

В то же время для принятия решений о строительстве ветроэлектростанций необходимо учитывать не только среднегодовую скорость ветра, но и его внутригодовой режим. Так, в Таймырском районе средняя скорость ветра в летние месяцы в 1.3–1.5 раза ниже, чем в зимние, а внутригодовая повторяемость скоростей ветра ниже 3 м/с (минимальная стартовая скорость для большинства ветрогенераторов¹⁰) превышает 0.2 [10], что означает риски простоя ветроустановок в течение более 20% времени в году. В пределах года разброс скоростей ветра на Таймыре может меняться от 0 до 35–40 м/с при максимальной повторяемости, в сумме — около 0.5, скоростей от 4 до 9 м/с [10], что означает и резкие колебания выработки электроэнергии, учитывая то, что ее значение пропорционально кубу скорости ветра. Как следствие, в дополнение к ветроагрегатам необходимы, с одной стороны, резервные мощности, работающие на других источниках энергии, с другой — аккумулирующие мощности. Для точных расчетов в точке предполагаемого строительства ВЭС требуется проведение дополнительного ветромониторинга.

На данный момент отсутствует информация о действующих ветровых станциях на территории края; существуют планы их строительства, в частности, ВЭС мощностью 200 МВт на Таймыре¹¹, но, по всей вероятности, их реализация отодвигается.

Также проводились исследования перспектив использования ВИЭ в децентрализованных районах Красноярского края [11]. В данном случае рассматривались перспективы солнечной и гидроэнергетики, и в качестве наиболее перспективных районов с точки зрения природных условий для обоих направлений возобновляемой энергетики был выделен ряд южных районов Красноярского края.

В то же время обращает на себя внимание солнечно-энергетический потенциал Эвенкийского и Туруханского районов и территорий к югу от 60°–62° с.ш. Общий тренд поступающей солнечной радиации и, как следствие, производительности солнечных батарей в России заключается в увеличении не только с севера на юг, но и с запада на восток, с ростом континентальности климата, обуславливающей небольшую облачность и большое количество часов и дней с солнечным сиянием. Именно эта тенденция была использована в Якутии, а позже и в Эвенкийском районе (см. выше).

По направлению от Москвы до Верхоянска производительность солнечных модулей растет, несмотря на повышение широты (рис. 2). В центральной части Эвенкии она будет примерно той же, что и в центре европейской части России к востоку от Москвы, на линии Владимир-Чебоксары — 3.31–3.33 кВтч/кВт в сутки. Таким образом, в южных частях Туруханского района, центральных, южных и восточных частях Эвенкийского района возможна эффективная работа солнечных батарей, как минимум в летнее время.

Если говорить о Таймырском районе, производительность солнечных батарей меняется примерно от 2.87 кВт ч/кВт (Диксон) до 3.07 кВт ч/кВт (Хатанга), что дает основания рассматривать целесообразность использования солнечных батарей в летнее время в юго-восточных частях района. В то же время во всех случаях следует учитывать отсутствие солнца в ночное время и малое количество или полное отсутствие поступления солнечной энергии зимой. В частности, в Туре среднесуточная

¹⁰ <https://inner.su/articles/tablitisa-vetrogeneratorov-moshchnost-ot-skorosti-vetra-kharakteristiki-2025/> (дата обращения: 15.07.2025).

¹¹ <https://rawi.ru/2022/07/novaya-ves-na-taymyre-moshhnostyu-200-mvt-mozhet-nachat-rabotu-v-2024-godu/> (дата обращения: 02.04.2025).

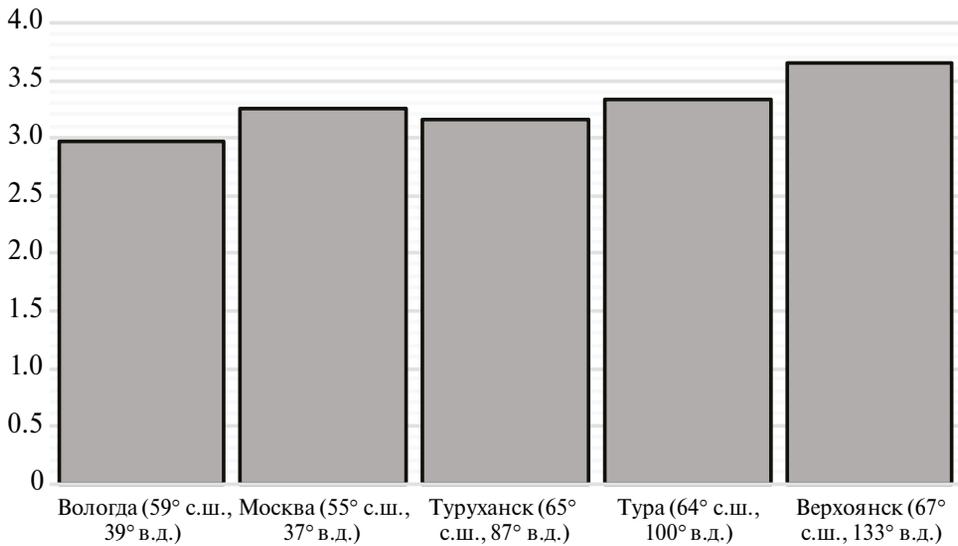


Рис. 2. Расчетная годовая среднесуточная выработка электроэнергии (кВт ч) солнечным модулем “Хевел-395” мощностью 1 кВт, расположенным под углом к горизонтальной поверхности, равном широте местности, в отдельных точках на территории России (составлено авторами на основе данных¹²).

Fig. 2. Estimated annual average daily electricity generation (kW h) by a Hevel-395 solar photovoltaic module of 1 kW capacity, located at an angle to the horizontal surface equal to the latitude of the terrain at certain points on the Russia’s territory (created by the authors using the information¹²).

производительность солнечного модуля “Хевел-395” мощностью 1 кВт, ориентированного к земной поверхности под углом, равным широте, будет варьировать от 0.5 кВт ч в декабре до 5.5 кВт ч в апреле¹³. В данном случае, так же как и с ветроустановками, необходимы аккумулирующие и резервные мощности, компенсирующие дефицит выработки электроэнергии в определенные периоды.

Оценка энергетических потребностей северных районов Красноярского края и варианты их обеспечения

Годовые объемы северного завоза в исследуемый регион: уголь в Таймырский и Туруханский районы — 71.4 тыс. т, нефтепродукты в Туруханский и Эвенкийский районы — 21.3 тыс. т, сырая нефть в Эвенкийский район — 12.2 тыс. т [12]. В пересчете на энергетический эквивалент это в сумме составляет примерно 1 млрд кВт ч энергии. Долю топлива, используемую для производства электроэнергии, можно оценить в 50%, или 500 млн кВт ч. При КПД тепловых электростанций (в частности, ДЭС), равном 40%, означает выработку примерно 200 млн кВт ч. Численность населения этих трех районов (исключая Дудинку, получающую электроэнергию из Таймырского энергорайона) составляет 37 тыс. человек; таким образом, душевое производство и потребление электроэнергии составляет примерно 5400 кВт ч в год.

¹² <https://gisre.ru/map-sunres/photovoltaic> (дата обращения: 02.04.2025).

¹³ <https://gisre.ru/map-sunres/photovoltaic/?lat=63.5&lon=99.5&model=Hevel&comment=lat> (дата обращения: 16.07.2025).

Теоретически для выработки 200 млн кВт ч электроэнергии в год в природных условиях региона требуется примерно 230 тыс. кВт (округленно) солнечных электроэнергетических мощностей со среднегодовым коэффициентом установленной мощности (КИУМ), равным 10%, или 115 тыс. кВт ветроэлектростанций с КИУМ, равным 20%. В пересчете на душу населения это составит, соответственно, 6 кВт СЭС либо 3 кВт ВЭС (округленно).

Исходя из имеющихся данных об инвестиционных затратах на строительство солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций России [13] и международных оценок [14], с поправкой на усложненную логистику исследуемой территории, можно предварительно оценить удельные инвестиционные затраты на строительство СЭС в 100 000 руб./кВт, ВЭС — 150 000 руб./кВт.

В свою очередь, это означает душевые затраты в 450–600 тыс. рублей, для обеспечения одного населенного пункта в 100 человек — 45–60 млн рублей, а для всего населения энергоизолированных территорий Красноярского края — 17–23 млрд рублей.

При этом следует учитывать неравномерность выработки энергии, прежде всего — практически полное отсутствие солнечной энергии в зимнее время. В частности, расчетная среднесуточная выработка солнечной энергии 1 кВт солнечной электростанции в Туре достигает 6 кВт ч в светлое время года и снижается до 0.4 кВт ч в декабре при среднегодовой величине 3.3 кВт ч/сутки (см. выше), притом что зимой потребность в электроэнергии выше, чем летом.

Таким образом, при любом количестве установленных солнечных и ветровых мощностей потребуются сохранение резервных мощностей ДЭС и их использование в периоды суточного и сезонного энергетического дефицита. При этом в летнее время с большой вероятностью образуется избыточное количество электроэнергии, что потребует отключения значительной части мощностей. Теоретическим выходом может стать аккумуляция энергии, но это потребовало бы в масштабах всей энергоизолированной территории десятков миллионов кВт ч аккумулирующих мощностей, что при удельных капиталовложениях в системы аккумуляции более \$200/кВт ч [15] означало бы дополнительные инвестиции в объемах порядка миллиардов долларов США или сотен миллиардов рублей — затраты, на порядок превышающие инвестиции в собственно строительство электростанций на ВИЭ.

В связи с этим целесообразным представляется, при сохранении комбинации ДЭС-ВИЭ, постепенное наращивание мощностей ВИЭ вплоть до достижения оптимального соотношения мощностей ВИЭ и ДЭС. Это позволит экономить дизельное топливо и, как следствие, сокращать объемы “северного завоза”.

В настоящее время на основе опыта эксплуатации дизель-солнечных электростанций в Республике Саха–Якутия¹⁴ можно рассчитать, что работа 1 кВт солнечной электростанции позволяет сэкономить 0.3–0.4 т дизельного топлива в год (что эквивалентно выработке 1000–1200 кВт ч на 1 кВт установленной мощности). При оптовых ценах дизельного топлива в настоящее время около 90 тыс. руб./т¹⁵ это означает ежегодную экономию более 30 тыс. рублей и, как следствие, простой срок окупаемости солнечных модулей менее 3.5 года; при расчетах с использованием ставки дисконтирования в 10% срок окупаемости увеличивается до 4 лет.

¹⁴ https://rushydro.ru/activity/production/solnechnaya-generatsiya/?ysclid=m7hti2zrsj32613301&utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (дата обращения: 02.04.2025).

¹⁵ <https://ttk.nornickel.ru/prices/> (дата обращения: 02.04.2025).

В свою очередь, использование ветровой энергии в районах с благоприятными условиями (см. рис.1) может означать ежегодную экономию, учитывая более высокий КИУМ ВЭС, 0,6–0,8 т дизельного топлива в год на 1 кВт установленной мощности; таким образом, простой срок окупаемости составит 2,4 года, дисконтированный — около 3 лет.

В плане оценки экономической эффективности представляет интерес также сокращение внешних, или экстернальных, издержек (экстернальностей, externalities, или external costs) [16, 17]. Несмотря на высокую степень неопределенности и даже субъективности в такого рода оценках, в первом приближении можно взять за основу количество выбросов парниковых газов, сокращающееся за счет замещения ВИЭ части дизельного топлива. При сжигании 1 т мазута в атмосферу эмитируется 3,1 т CO₂-экв¹⁶, таким образом, 1 кВт СЭС снижает выбросы в среднем на 1 т в год, 1 кВт ВЭС — на 2 т ежегодно. Оценить эффект в денежном эквиваленте можно через котировки CO₂ на бирже — в среднем цена 1 т CO₂ составляет \$70¹⁷, или 6200 руб., то дополнительное сокращение издержек или дополнительный рост дохода от использования 1 кВт СЭС составит 2170 руб. в год, 1 кВт ВЭС — 4340 руб. в год. Этот эффект можно использовать и для строительства электростанций на основе ВИЭ в рамках “климатических проектов” [18].

В свою очередь, для выбора оптимальной структуры мощностей ВИЭ (доли ветровых, солнечных, гидро-, в перспективе также биоэнергетических электростанций) принципиальное значение имеют местные условия. В Туруханском и Эвенкийском районах существуют возможности развития электроэнергетики на основе солнечной энергии, биоэнергии древесных отходов и гидроэнергии малых рек.

В Таймырском районе существенно лучше условия использования ветровой энергии, однако почти отсутствует биоэнергетический ресурс, существенно меньше ресурсы солнечной энергии, а также, вероятно, ниже потенциал гидроэнергии в силу более длительного периода замерзания рек.

Дополнительным фактором является доступность и специализация территории. В целом Туруханский и Эвенкийский районы отличаются лучшей транспортной доступностью со стороны краевого центра по сравнению с Таймырским районом, что в принципе создает лучшие перспективы для развития, в том числе — энергетики на местных источниках.

С другой стороны, Таймырский район имеет выход к Северному морскому пути и, одновременно, граничит с крупным Норильским горнопромышленным центром. Таймырский район отличается более высокой численностью населения, чем Туруханский и Эвенкийский районы, вместе взятые, при несколько меньшей территории (см. табл. 1). При этом, в отличие от Туруханского и Эвенкийского районов с относительно дисперсным расселением, практически все население (более 95%) Таймырского района сосредоточено в трех населенных пунктах: городе Дудинке (19 тыс.) и поселках Караул (3,8 тыс.) и Хатанга (5,4 тыс.). Все три населенных пункта привязаны к Севморпути; Дудинка также к Норильску. Исходя из текущего потепления климата, ведущего к сокращению площади морских льдов и увеличению безледного периода в арктических морях, а также изменения геополитической

¹⁶ <https://sro150.ru/index.php/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovyykh-gazov> (дата обращения: 02.04.2025).

¹⁷ <https://ru.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data> (дата обращения: 02.04.2025).

и экономической конъюнктуры — переориентации на восточноазиатские рынки, можно предположить улучшение перспектив использования Севморпути в качестве транспортного коридора. Программа его развития утверждена в качестве официального документа¹⁸. Это открывает перед Таймырским районом дополнительные возможности, а также означает увеличение его потребностей в новых энергетических мощностях.

Таким образом, существуют принципиальные различия между районами. Туруханский и Эвенкийский районы можно рассматривать как сельскую периферию Красноярского края с возможным очаговым или линейным вдоль Енисея развитием небольших промышленных производств. Вряд ли ситуация принципиально изменится в обозримой перспективе.

Таймырский район имеет собственный источник экономического роста и развития, связанный с крупной и перспективной морской магистралью и ближайшим крупным промышленным центром. Как следствие, и более активная разработка природных ресурсов региона в обозримой перспективе более вероятна в Таймырском районе, чем в Эвенкийском.

В этой ситуации Туруханский и особенно Эвенкийский район становятся своего рода обширным природным хинтерландом между Красноярском и Транссибирской магистралью, с одной стороны, и Таймыром — с другой.

В связи с этим, в контексте возобновляемой энергетики, для Таймыра наиболее реалистичным сценарием выглядит опора на относительно крупные ветропарки, привязанные к крупным населенным пунктам и, вероятно, связанные с Норильским энергорайоном. При этом автономное энергообеспечение на основе местных ВИЭ для ряда небольших и отдаленных точек выглядит довольно сложной задачей.

Тем не менее сложней и дороже являются экологические последствия использования традиционного углеводородного топлива. Так, 29 мая 2020 г. на Норильской ТЭЦ-3 произошел разлив топлива, было загрязнено более 180 тыс. м². Из резервуара вылились более 21 тыс. т дизельного топлива и попали в реки Амбарная и Далдыкан. В р. Амбарная попало около 15 тыс. т. Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в реке превысила норму в 10 000 раз. Кроме того, в грунт попали еще около 6 тыс. т нефтепродуктов. На территории Красноярского края из-за разлива была объявлена чрезвычайная ситуация федерального масштаба¹⁹.

В свою очередь, для Туруханского района, Эвенкии и прилегающих северных частей Енисейского, Северо-Енисейского, Мотыгинского, Богучанского и Кежемского районов перспективным в обозримом будущем является развитие диверсифицированной (включающей солнечную, гидро- и биоэнергетику) энергетики, представленной многочисленными малыми автономными мощностями в привязке к местным населенным пунктам и отдельным домохозяйствам. В отдаленной перспективе ситуация может измениться в случае дальнейшего усиления восточного вектора политики и экономики России, что может повлечь за собой более интенсивное освоение ресурсов данных территорий.

¹⁸ <http://government.ru/docs/46171/> (дата обращения: 16.07.2025).

¹⁹ <https://www.forbes.ru/obshchestvo-photogallery/402193-krupneyshaya-katastrofa-v-arktike-cto-izvestno-o-razlive-topliva> (дата обращения: 02.04.2025).

Заключение

Энергоизолированные территории Красноярского края можно разделить на две части: 1) северная — относящаяся к тундровой и лесотундровой зоне — это территория Таймырского Долгано-Ненецкого района (включая Дудинку и Диксон), лежащая, главным образом, к северу от линии Северного полярного круга; 2) южная — относящаяся, в основном, к северо-таежной зоне и включающая территории Туруханского, Эвенкийского (в т.ч. населенные пункты Игарка, Туруханск, Тура), и прилегающих к ним Енисейского, Северо-Енисейского, Мотыгинского, Богучанского и Кежемского районов (см. карту на рис. 1). В силу комплекса природных и экономико-географических условий в северной части, прилегающей к Северному Ледовитому океану и Севморпути, целесообразным представляется развитие прежде всего ветроэнергетики, в том числе строительство крупных ветростанций; в южной, внутриконтинентальной, предпочтительнее диверсифицированная малая автономная энергетика, включающая солнечные, гидроэнергетические, биоэнергетические мощности.

Полное замещение привозного ископаемого топлива местными ВИЭ на энергоизолированных территориях не представляется возможным в силу высоких инвестиционных затрат и нестабильности ВИЭ, однако целесообразно постепенное наращивание мощностей ВИЭ в составе гибридных (ДЭС-ВИЭ) систем, что позволит сэкономить часть топлива и сократить объемы его завоза. Сроки окупаемости проектов увеличения доли СЭС и ВЭС с точки зрения экономии привозного топлива оцениваются в величину 3–4 года, а с учетом снижения внешних издержек могут быть дополнительно сокращены.

Список литературы

1. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т.И. Андреевко, Т.С. Габдрахманова, О.В. Данилова и др. — РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 2015. — 160 с.
2. Корпачев В.П., Андрияс А.А., Пережилин А.И. Оценка объема отходов лесозаготовок в Красноярском крае // Вестник КрасГАУ. 2010. № 7. С. 7–10.
3. Татаринцева А.П. Методические указания по определению объемов вторичных древесных ресурсов. Утверждено Минлесбумпромом СССР. Гослесхозом СССР. Москва. 1988.
4. Майорова Л.П. К вопросу оценки объемов вторичных древесных ресурсов. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2006. № 1(2), С. 65–80.
5. Макаренко Е.Л. Оценка образования отходов лесозаготовки и деревообработки в центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 63–69.
6. Дегтярев К.С., Синюгин О.А. Территориальная организация возобновляемой энергетики России // Окружающая среда и энерговедение. 2024. № 1, с. 36–50.
7. Местников Н.П. Разработка способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций в условиях Севера // Доклад на XIV Всероссийской научной молодежной школе “Возобновляемые источники энергии. Роль возобновляемой энергетики при переходе к углерод-нейтральной экономике”. Москва, географический факультет МГУ, 21.11.2024.
8. Обручев С.В. Тунгусский уленосный бассейн / Сергей Обручев. — М.: Тип. “Моск. изд-во”, 1919. 32 с., 1 л. карт.; 28 см.
9. Аблажей А.М., Аблажей Н.Н. Эвенкийская ГЭС: “за” и “против” (к истории обсуждения мегапроекта) // Исторический курьер. 2022. № 1 (21). С. 184–216. URL: <http://istkurier.ru/data/2022/ISTKURIER-2022-1-17.pdf>

10. Ветроэнергетика Красноярского края / А.В. Бастрон [и др.]; Краснояр. гос. аграр. ун-т. — Красноярск, 2015. 252 с.
11. Курочкина Ю.В., Носков М.Ф. Оценка возможности использования возобновляемых источников энергии в децентрализованных районах Красноярского края. // Гидроэлектростанции в XXI веке: сборник материалов заочного этапа VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов (Саяногорск; Черемушки, 12 мая 2020 г.). Саяногорск; Черемушки: СШФ СФУ, 2020. С. 337–344. Библиогр.: с. 344 (4 назв.).
12. Соколов Ю.И. Риски северного завоза // Проблемы анализа риска. Т. 16. 2019. № 4. С. 32–47. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-4-32-47>
13. Дегтярев К.С., Березкин М.Ю., Синюгин О.А. Оценка инвестиционных затрат на переход к безуглеродной экономике в России к 2060 году // Окружающая среда и энергетика. 2022. № 2. С. 29–39.
14. Renewable Power Generation Costs in 2022. IRENA, 2023.
15. Cole, Wesley and Akash Karmakar. 2023. Cost projections for utility-scale battery storage: 2023 update. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A40-85332. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85332.pdf>
16. Сердитова Н.Е. Теория экстерналий издержек окружающей среды / Н.Е. Сердитова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2005. № 1. С. 145–162. EDN LVNUTK
17. Welsch Heinz (2016). Electricity externalities, siting, and the energy mix: a survey. Oldenburg Discussion Papers in Economics. No. V-394-16, University of Oldenburg, Department of Economics, Oldenburg.
18. Дегтярев К.С., Синюгин О.А., Березкин М.Ю. Развитие финансово-рыночных инструментов низкоуглеродного развития в России // Окружающая среда и энергетика. 2023. № 2. С. 16–29.

Prospects for the Use of Renewable Energy Sources in the North of the Krasnoyarsk Territory

M.Yu. Berezkin, K.S. Degtyarev*, O.A. Sinyugin

Lomonosov Moscow State University

**E-mail: kir1111@rambler.ru*

Received 09.04.2025

Revised 17.07.2025

Accepted 24.07.2025

The article evaluates the volume and structure of local renewable energy resources in the northern regions of the Krasnoyarsk Territory, characterized by extreme natural conditions, low population density and isolation from main power transmission lines. This is the territory north of Angara, the main part of which falls on the Taimyr Dolgan-Nenets, Evenki and Turukhansky districts. Electricity in these areas is produced using expensive imported fossil fuels, and an urgent task is to assess the possibilities of replacing it with local renewable energy resources — solar, wind, hydro, and bioenergy. The article examines the potential of these sources, differentiates the territory in terms of their volume and territorial distribution. There are two zones within the study area. In the northern one, the Taimyr region, the development of wind energy, including the construction of large wind farms, is preferable. In the south one, represented by Evenki, Turukhansk and adjacent districts, small autonomous diversified energy

sector, represented by solar power plants, hydroelectric power plants and bioenergy stations, is promising. Taimyr is a territory linked to the Northern Sea Route and the Norilsk industrial district. Thus, the territory between it and the economically developed south of the Krasnoyarsk Territory becomes a kind of vast natural hinterland. It is impossible to completely replace imported fuels with local resources due to the instability of renewable sources, but gradually increasing their share within the framework of hybrid energy complexes is effective. Diesel fuel savings are 0.3–0.8 tons per year, and CO₂ emissions reduction is 1–2 tons per year for every 1 kW of installed solar or wind power plant capacity. The payback period for a unit of installed capacity based on renewable sources will be 3–4 years, and reducing external costs provides additional economic benefits.

Keywords: Krasnoyarsk Territory, Taimyr district, Evenki district, renewable energy sources, solar energy, wind energy, hydropower, bioenergy, renewable energy economics, energy supply

References

1. Atlas of renewable energy sources in the Russian Territory: scientific edition / T.I. Andreenko, T.S. Gabderahmanova, O.V. Danilova et al. RHTU named after D.I. Mendeleev, 2015, 160 p. Atlas resursov vozobnovlyaemoi energii na territorii Rossii. (in Russ.)
2. Korpachev V.P., Andriyas A.A., Perezhilin A.I. Estimation of the lumbering waste in Krasnoyarsk Region // The Bulletin of KrasGAU, 2010, 7, 7–10. Ocenka obema otxodov lesozagotovok v Krasnoyarskom krae. Vestnik KrasGAU (in Russ.).
3. Tatarintseva A.P. Methodological guidelines for determining the volume of secondary wood resources. Approved by the USSR Ministry of Forestry and Industry. Gosleskhov of the USSR. Moscow. 1988. Tatarinceva A.P. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu obemov vtorichnyx drevesnyx resursov. Utverzhdeno Minlesbumpromom SSSR. Gosleskhozom SSSR. (in Russ.)
4. Mayorova L.P. On the issue of estimating the volume of secondary wood resources. Bulletin of the Far-East State University, 2006, 1(2), 65–80. K voprosu ocenki obemov vtorichnyx drevesnyx resursov. Vestnik Tixookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. (in Russ.)
5. Makarenko E.L. Assessment of forestry and woodworking waste formation in central ecological area of the Baikal natural territories // Advances of the Modern Natural Sciences [Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya]. — 2020, 5, 63–69. Ocenka obrazovaniya otxodov lesozagotovki i derevoobrabotki v centralnoj ekologicheskoy zone Bajkalskoj prirodnoj territorii. Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. (in Russ.)
6. Degtyarev K.S., Sinyugin O.A. Territorial design of renewable power industry in Russia // Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2024, 1, 36–50. (in Russ.)
7. Mestnikov N.P. Development of ways to increase the energy efficiency of solar power plants in the conditions of the North // Report at the XIV All-Russian Scientific Youth School “Renewable energy sources. The role of renewable energy in the transition to a carbon-neutral economy”. Moscow, Faculty of Geography, Moscow State University, 11/21/2024 (in Russ.)
8. Obruchev S.V. Tunguska coal-bearing basin — Moscow: Tip. “Moscow. publishing house”, 1919. 32 p. (in Russ.)
9. Ablazhey A.M., Ablazhey N.N. Evenki HPP: “pros” and “cons” (on the history of the mega-project discussion) // Historical Courier (Istoricheskij kur'er), 2022, 1 (21), 184–216. URL: <http://istkurier.ru/data/2022/ISTKURIER-2022-1-17.pdf> (in Russ.)
10. Wind energy of Krasnoyarsk Region / A.V. Bastron [et al.]; Krasnoyarsk State Agrarian University, 2015, 252 p. (in Russ.)
11. Kurochkina Yu.V., Noskov M.F. Assessment of the possibility of using renewable energy sources in decentralized areas of the Krasnoyarsk Territory // Hydroelectric power plants

in the XXI century: a collection of materials from the correspondence stage of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, specialists, postgraduates and students (Sayanogorsk; Cheryomushki, May 12, 2020). Sayanogorsk; Cheryomushki: SSHF SibFU, 2020, 337–344. (in Russ.)

12. Sokolov Yu. I. Risks of northern importation (Riski severnogo zavoza) // Problems of risk analysis. Vol. 16. 2019. 4, 32–47. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-4-32-47> (in Russ.)

13. Degtyarev K.S., Sinyugin O.A., Berezkin M.Yu. Estimations of the investment costs for transition to carbon-free economy in Russia by 2060 // Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2022, 2, 29–39. (in Russ.)

14. Renewable Power Generation Costs in 2022. IRENA, 2023.

15. Cole, Wesley and Akash Karmakar. 2023. Cost projections for utility-scale battery storage: 2023 update. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A40-85332. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85332.pdf>

16. Serditova N.E. Theory of environmental externalities // Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University, 2005, 1, 145–162. EDN LVNUTK

17. Welsch Heinz (2016). Electricity externalities, siting, and the energy mix: a survey. Oldenburg Discussion Papers in Economics, No. V-394-16, University of Oldenburg, Department of Economics, Oldenburg.

18. Degtyarev K.S., Sinyugin O.A., Berezkin M.Yu. Development of financial and market instruments of low-carbon development in Russia // Journal of Environmental Earth and Energy Study, 2023, 2, 16–29. (in Russ.)