

Научная статья
УДК 621.548 (470.2)
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.001

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЦЕНТРЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ СЕВЕРА КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ЗА 50 ЛЕТ

Валерий Андреевич Минин

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, v.minin@ksc.ru*

Аннотация

Представлена краткая история создания Отдела энергетики Кольского филиала Академии наук (КФАН) СССР, который занимался изучением перспектив использования энергии ветра в условиях Севера. Описан ветроэнергетический полигон на побережье Баренцева моря, в пос. Дальние Зеленцы, где проводились многолетние испытания отечественных ветроэнергетических установок. Даны основные характеристики ветра в прибрежных районах Западного сектора Арктики. Рассмотрены основные направления возможного использования энергии ветра: работа ветропарков в составе электроэнергетической системы, совместная работа ветроэнергетических установок с дизельными электростанциями и котельными установками с целью экономии топлива, получение с использованием энергии ветра экологически чистого топлива — водорода. Описан многолетний опыт сотрудничества с зарубежными странами.

Ключевые слова:

Европейский Север, энергия ветра, ветроэнергетические установки, ветропарк, внедрение ВЭУ в энергетику региона

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Original article

WIND ENERGY RESEARCH IN NERC KSC RAS FOR 50 YEARS

Valerii A. Minin

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, v.minin@ksc.ru*

Abstract

A brief history of the founding of the Energy Department of the Kola Branch of the Academy of Sciences of the USSR, which studied prospects for the use of wind energy in the conditions of the North, is given. A wind power test site on the coast of the Barents Sea in the village of Dalniye Zelentsy, where long-term tests of domestic wind turbines were carried out, is described. The main parameters of wind in the coastal areas of the Western sector of the Arctic are presented. The main directions of the possible use of wind energy are considered: operation of wind farms as part of the electrical power system, joint operation of wind turbines with diesel power plants and boiler units in order to save fuel, production of environmentally friendly fuel — hydrogen by the use of wind energy. The long-term experience of cooperation with foreign countries is presented.

Keywords:

European North, wind energy, wind turbines, wind farm, introduction of wind turbines in the regional energy sector

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

История создания Отдела энергетики КФАН СССР

Активное хозяйственное освоение природных богатств Мурманской области началось в 30-е гг. прошлого века. В то время на Кольском полуострове уже были открыты месторождения медно-никелевых руд в Мончетундре, железных руд в районе Оленегорска и Ковдора, кианитовых руд в Кейвах и др. Эти полезные ископаемые послужили основой для развития горной и горно-металлургической промышленности Мурманской области. Выросли города Кировск, Мончегорск, Оленегорск, Апатиты, Ковдор, Заполярный и др. Кольский полуостров стал одним из развитых промышленных центров в стране.

Практическое освоение минерального сырья и переработка апатит-нефелиновых руд и руд цветных и редких металлов требовали опережающего развития энергетики. С этой целью в регионе было начато гидроэнергетическое строительство на реках Нива, Ковда, Тулома, Паз и др. В 1934 г.

в эксплуатацию была пущена Мурманская ТЭЦ мощностью 12 МВт. Тогда же на реке Ниве в южной части Кольского полуострова было начато строительство первой гидроэлектростанции региона — Нива ГЭС-II. В период 1932–1938 гг. на этой ГЭС были введены в эксплуатацию 4 гидротурбины суммарной мощностью 60 МВт. В дальнейшем в 1937–1941 гг. были введены в строй 4 гидротурбины мощностью 50 МВт на Нижне-Туломской ГЭС, расположенной недалеко от Мурманска. На базе двух названных гидроэлектростанций, а также воздушной линии электропередачи 110 кВ Кандалакша — Мурманск было образовано районное энергетическое управление (РЭУ) «Колэнерго».

В послевоенные годы было продолжено освоение гидроэнергетических ресурсов Мурманской области. В декабре 1949 г. была введена в эксплуатацию станция Нива ГЭС-III мощностью 155 МВт, после чего суммарная мощность Кольской энергосистемы приблизилась к 300 МВт [1]. Структура мощности энергосистемы на 95 % была представлена гидроэлектростанциями.

В 1950 г. был образован Кольский филиал АН СССР, в который входило четыре научных учреждения: Геологический институт, Биологический институт, Отдел экономики и Отдел гидроэнергетики. Основной задачей последнего было изучение гидроэнергетических ресурсов региона с целью дальнейшего строительства гидроэлектростанций. Сотрудниками отдела в 1958–1962 гг. были изучены энергетические ресурсы рек Восточная Лица и Харловка [2], Поной [3], Варзина и Дроздовка [4; 5], Умба [6], Варзуга и Стрельна [7; 8], впадающих в Баренцево и Белое моря. До настоящего времени практическое освоение энергоресурсов этих рек, в силу удаленности предполагаемых объектов гидроэнергетики и соображений экологической безопасности, не началось. Сейчас в Кольскую энергосистему входят 17 ГЭС на реках, протекающих в центральных районах Мурманской области (Нива, Ковда, Тулома), а также в приграничных с Норвегией и Финляндией районах (Паз).

В 1961 г. Отдел гидроэнергетики был преобразован в Лабораторию гидроэнергетики и комплексных водохозяйственных проблем и вошел в состав Горно-металлургического института КФАН СССР. Созданная лаборатория продолжила исследования, способствующие дальнейшему развитию Кольской энергосистемы за счет использования гидроэнергетических ресурсов региона. Наряду с этим были начаты изыскания, направленные на изучение возможностей вовлечения в оборот ветроэнергетических ресурсов [9; 10].

В 1971 г. в лаборатории была организована небольшая рабочая группа из четырех человек (руководитель Куклин Евгений Иванович, сотрудники Елистратов Валентин Петрович, Малиновский Николай Семенович, Минин Валерий Андреевич), которая начала активное изучение перспектив использования энергии ветра и других возобновляемых источников энергии.

В 1972–1973 гг. большое внимание было уделено изучению особенностей режима ветра на северном и южном побережьях Кольского полуострова, а также оценке технико-экономической эффективности применения ветроэнергетических установок (ВЭУ) для энергоснабжения потребителей Севера.

В результате сотрудничества со специалистами Мурманского управления гидрометеослужбы были сформированы 10-летние ряды восьмисрочных наблюдений за ветром (8 замеров в сутки) по метеостанциям «Умба», «Кашкаранцы», «Чаваньга», «Терско-Орловский маяк», «Мыс Чёрный», «Дальние Зеленцы», «Цып-Наволоок». На основании этих данных были исследованы повторяемость скоростей ветра, возможная длительность рабочих периодов ветра и энергетических затиший, среднегодовая выработка отдельных типов ветроустановок. Тогда же был поставлен вопрос о необходимости экспериментальных исследований работы ВЭУ в суровых природно-климатических условиях Севера. В 1973 г. были выполнены подготовительные работы по организации экспериментальной площадки в пос. Дальние Зеленцы на побережье Баренцева моря для проведения экспериментальных испытаний опытных образцов ветроустановок.

Можно отметить, что на возможность использования энергии ветра в заполярных районах Кольского полуострова, крайнем западном регионе Арктической зоны РФ, обращали внимание еще в 30–40-е гг. прошлого века. Уже тогда отмечалось, что для прибрежных арктических районов с их бескрайними просторами характерны повышенные скорости ветра. Это объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, тем, что на севере Европы циклоны с Атлантики преимущественно перемещаются в направлении с юго-запада на северо-восток. Во-вторых, в прибрежных районах Кольского полуострова незамерзающие воды теплого течения Гольфстрим соседствуют с холодной материковой частью

полуострова, что способствует формированию так называемой термической составляющей ветра. Соседство холодной суши с теплым морем вызывает усиленное перемещение воздушных масс от холодного берега в сторону незамерзающего Баренцева моря. В силу этих двух обстоятельств северное побережье Кольского полуострова характеризуется сильными ветрами юго-западного направления.

В 1973 г. Лаборатория гидроэнергетики и комплексных водохозяйственных проблем была выведена из состава Горно-металлургического института КФАН СССР и преобразована в Отдел энергетики при Президиуме КФАН.

Ветроэнергетический полигон в пос. Дальние Зеленцы

В 1974 г. рабочей группой отдела, занимавшейся вопросами ветроэнергетики, на северном побережье Кольского полуострова, в районе пос. Дальние Зеленцы, был организован ветроэнергетический полигон (рис. 1, 2). В самом поселке тогда располагался Мурманский морской биологический институт КФАН СССР. Таким образом, созданный полигон оказался под крылом родственного академического учреждения.

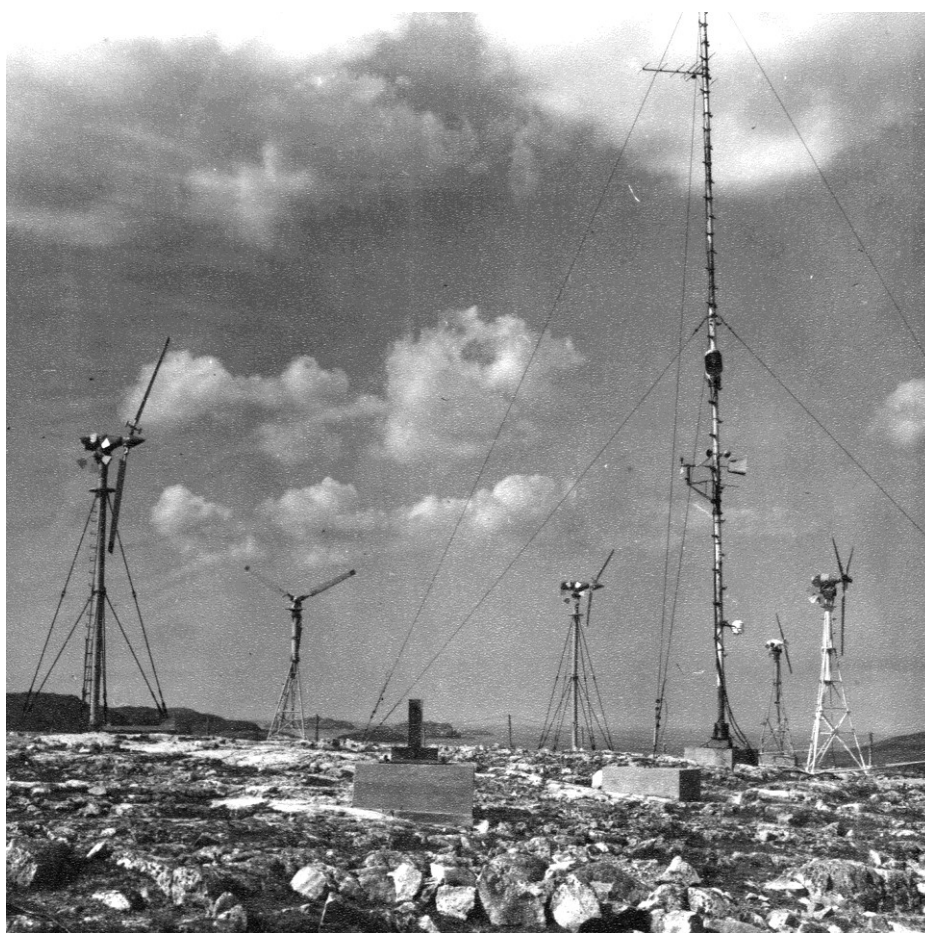


Рис. 1. Ветроэнергетический полигон на северном побережье Кольского полуострова в районе пос. Дальние Зеленцы. Установленное оборудование (слева направо): АВЭУ (1–4) 6 (4 кВт), ВЭУ «Ветерок» (2 кВт), АВЭУ (1–4) 6, метеомачта высотой 15 м, ВЭУ «Беркут» (2 кВт), ВЭУ «Ветерок» (2 кВт)

Fig. 1. The wind power test site on the northern coast of the Kola Peninsula near the settlement of Dalniye Zelentsy. Installed equipment (from left to right): autonomous wind turbine (1–4) 6 (4 kW), wind turbine “Veterok” (2 kW), autonomous wind turbine (1–4) 6, a weather mast with a height of 15 m, wind turbine “Berkut” (2 kW), wind turbine “Veterok” (2 kW)



Рис. 2. Вспомогательные помещения полигона: слева — жилое помещение для обслуживающего персонала, справа — помещение для приборов и контрольного оборудования, сзади — помещение для выполнения слесарных и ремонтных работ

Fig. 2. The auxiliary buildings of the test site: on the left — the living building for the service staff, on the right — the building for instruments and control equipment, behind — the building for locksmith and repair work

Площадка полигона располагалась на возвышенности с отметкой около 60 м и характеризовалась высоким классом открытости на местности. Как показали дальнейшие многолетние измерения, среднегодовая скорость ветра на полигоне на высоте 10 м от поверхности земли составляет около 7,5 м/с, что более чем вдвое превышало значения скоростей в удаленной материковой части региона [11; 12]. Зимой здесь отмечается очевидный сезонный максимум интенсивности ветра, среднемесячные скорости ветра повышаются до 9–11 м/с. В отдельные периоды скорости достигают штормовых и ураганных значений (40 м/с и более). Погодные условия в районе полигона складываются под большим влиянием Атлантики, ее теплого течения Гольфстрим. Зимы здесь преимущественно мягкие, расчетная температура самой холодной пятидневки составляет $-23 \dots -25$ °С, в то время как в центральных районах Кольского полуострова этот показатель достигает $-30 \dots -35$ °С и ниже.

Время подтвердило правильность выбора площадки для полигона. По потенциалу, степени открытости на местности выбранная площадка являлась удачным местом для экспериментальной проверки работоспособности ВЭУ различного типа при работе в природно-климатических условиях Крайнего Севера.

Самый северный в стране полигон позволял проводить в естественных природных условиях исследование работы ВЭУ в широком диапазоне скоростей ветра, температуры наружного воздуха, влажности и других климатических факторов. Для измерения указанных параметров на метеорологической мачте были установлены необходимые приборы. Скорость ветра измерялась на высотных уровнях 5 и 15 м. На высоте 5 м был также установлен анеморумбограф, позволяющий фиксировать среднюю скорость ветра за каждые 10 минут. На протяжении 20 лет велись непрерывные наблюдения за скоростью и направлением ветра, позволившие получить энергетические характеристики режима ветра в этом районе.

Уже в 1974 г. на полигоне начались испытания ветроэнергетических агрегатов «Беркут» и «Ветерок» мощностью 2 кВт из опытно-промышленной партии, разработанной Всесоюзным институтом электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ, г. Москва). На рис. 3 представлен момент технического осмотра ветроагрегата «Ветерок» руководителем группы Е. И. Куклиным.

В 1976 г. Всесоюзным научно-исследовательским объединением «Циклон» (г. Истра, Московская область) в соответствии с договором о сотрудничестве была передана на испытания новая автономная ветроэлектрическая установка АВЭУ (1-4) 6 экспортного исполнения (рис. 4). Диаметр ветроколеса установки составлял 6 м, мощность — 4 кВт.

Установка вырабатывала электроэнергию стандартной частоты 50 Гц. На полигоне заблаговременно был подготовлен бетонный фундамент, на котором и была смонтирована установка. В дальнейшем был сформирован комплекс приборов и оборудования, с помощью которого проводились пуско-наладочные работы и изучение параллельной работы ветроустановки с другими источниками энергии. Через год на полигоне прошла испытание такая же серийная установка АВЭУ (1-4) 6, изготовленная на заводе «Ветроэнергомаш» в Астрахани. На рис. 5 заведующий Отделом энергетики КФАН д. т. н., проф. Игорь Родионович Степанов рассказывает об устройстве ветроустановки АВЭУ (1-4) 6 членам-корреспондентам РАН Михаилу Владимировичу Костенко и Николаю Николаевичу Ковалёву, посетившим ветроэнергетический полигон с визитом.

В последующие годы на испытания поступила ветроустановка разработки НИС Гидропроекта (г. Москва) мощностью около 7 кВт с ротором Дарье. В начале 1990-х гг. на полигоне прошла испытания многолопастная ВЭУ малой мощности разработки Московского авиационного института.



Рис. 3. Технический осмотр ветроагрегата «Ветерок»
на полигоне в пос. Дальние Зеленцы
Fig. 3. A technical inspection of the wind turbine “Veterok”
at the test site in the settlement of Dalniye Zelentsy



Рис. 4. Ветроустановка АВЭУ (1-4) 6
Fig. 4. The autonomous wind turbine (1-4) 6



Рис. 5. Заведующий Отделом энергетики д. т. н. И. Р. Степанов (в центре) знакомит чл.-корр. РАН М. В. Костенко и чл.-корр. РАН Н. Н. Ковалёва с устройством ВЭУ
Fig. 5. The head of the Energy Department, D.Sc. I. R. Stepanov (in the centre) introduces the design of the wind turbine to corresponding members of the RAS M. V. Kostenko and N. N. Kovalyov

После обобщения результатов длительных испытаний упомянутых выше ветроэнергетических установок «Беркут», «Ветерок», АВЭУ (1-4) 6 были сформулированы рекомендации по совершенствованию их конструкции [13; 14]. Отмечалось, что на всех ВЭУ были достигнуты проектные технические показатели. Коэффициент использования энергии ветра на установках «Беркут» и «Ветерок» за счет использования благоприятного аэродинамического профиля лопастей и их продольной крутки достигает 0,40–0,45 (при теоретическом максимуме 0,59). ВЭУ успешно прошли испытания в широком диапазоне скоростей ветра, вплоть до ураганных скоростей. При организации серийного производства рекомендовано улучшить технологию изготовления пластиковых лопастей и исключить возможность образования трещин на их кромках. Для ветроустановок, предназначенных к эксплуатации в суровых условиях морского климата Арктики, рекомендовано ограничить применение алюминиевых сплавов в связи с их интенсивной коррозией.

Разработка ветроэнергетического кадастра

В 1980 г. в Отделе энергетики КФАН были обобщены результаты исследования энергетических характеристик ветра в северных районах страны и разработан ветроэнергетический кадастр Европейского Севера СССР [15–17]. К расчетам были привлечены 10-летние ряды наблюдений за ветром на 168 метеостанциях Европейского Севера страны. При расчетах кадастровых характеристик все исходные данные были приведены к сравнимым условиям по открытости на местности (открытая ровная местность) и по высоте (10 м). Построена карта распределения среднегодовых скоростей ветра в таких условиях и выявлены районы, наиболее перспективные для использования энергии ветра (рис. 6). В связи с 50-летием Кольского филиала АН СССР результаты исследований были представлены на ВДНХ СССР. Сотрудники Е. И. Куклин и В. А. Минин за достигнутые успехи были награждены бронзовыми медалями (постановление № 903-Н от 27.11.1980 г.).

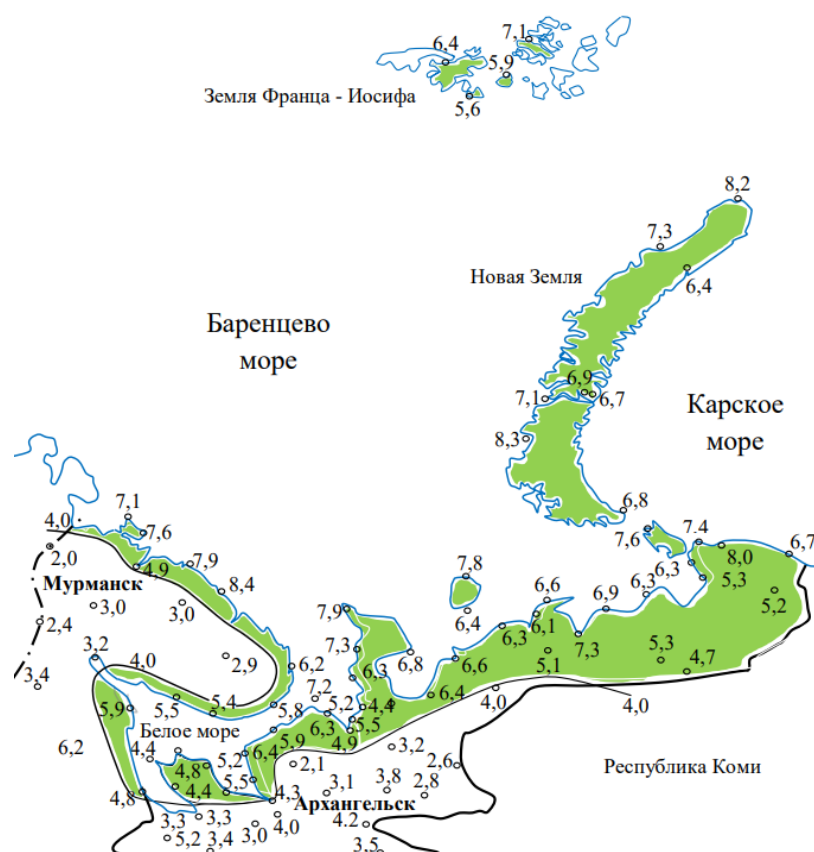


Рис. 6. Средние многолетние скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли на метеостанциях Западного сектора Арктики

Fig. 6. Average multi-year wind speeds at a height of 10 m above the ground at weather stations in the western sector of the Arctic

В 1982–1983 гг. сотрудниками Отдела энергетики было разработано предложение по созданию на берегу Баренцева моря, в районе пос. Дальние Зеленцы, опытно-промышленной ветроэлектрической станции (ВЭС) мощностью 1 МВт и показана его эффективность. Вслед за этим последовало предложение по созданию комплекса ветроэнергетических установок (ветропарка) общей мощностью 100 МВт в районе действующего каскада Серебрянских ГЭС, были представлены его возможные технико-экономические показатели. Результаты работ были переданы в головную организацию — институт «Гидропроект» Минэнерго СССР.

В ходе дальнейших исследований перспектив развития ветроэнергетики в Мурманской области и соседних районах в 1985–1986 гг. были определены предельные удельные капиталовложения в ВЭУ для целей электро- и теплоснабжения малых автономных потребителей. Показано, что в прибрежных районах с повышенным потенциалом ветра применение ВЭУ обеспечивает снижение приведенных затрат на 10–20 % и вытеснение органического топлива до 50–70 %. Результаты исследований были переданы НПО «Ветроэн» и институту «Гидропроект», на что получены соответствующие акты внедрения.

В 1986 г. ответственный исполнитель перечисленных работ по ветроэнергетике (В. А. Минин) успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Энергоснабжение малых изолированных потребителей в районах с повышенным потенциалом энергии ветра (на примере Европейского Севера СССР)». Научный руководитель — д. т. н., проф. И. Р. Степанов, зав. Отделом энергетики КФАН СССР. Защита диссертации проходила в Государственном научно-исследовательском энергетическом институте (ЭНИИ) им. Г. М. Кржижановского (г. Москва). По материалам диссертационной работы в 1989 г. в Ленинградском отделении издательства «Наука» была

опубликована монография [18], в которой изложена методика разработки ветроэнергетического кадастра, дана характеристика режима ветра Севера европейской части России, приведены технико-экономические показатели электро- и теплоснабжения потребителей с участием ВЭУ.

В 1987 г. сотрудники Отдела энергетики Валерий Андреевич Минин и Григорий Сергеевич Дмитриев приняли участие в работе датско-советского семинара в Таллине, где выступили с докладом. Участие в семинаре положило начало налаживанию международных контактов в области ветроэнергетики. В том же году названные сотрудники приняли участие в работе международного семинара ООН в Москве, посвященном проблеме использования возобновляемых источников энергии. Расширение международных связей и контактов в дальнейшем было продолжено.

В последующие годы были изучены режимы совместной работы ветроэнергетических установок с другими энергоустановками и электрической сетью. Были разработаны методика и программа расчета на ЭВМ переходных процессов в синхронных генераторах ВЭУ при их совместной работе с энергосистемой, определены пути повышения устойчивости работы синхронного генератора ВЭУ при порывах ветра, выполнены натурные исследования совместной работы ВЭУ с электрической сетью в условиях ветроэнергетического полигона на северном побережье Кольского полуострова.

В 1990 г. на базе Отдела энергетики КФАН в соответствии с постановлением Президиума АН СССР был организован Институт физико-технических проблем энергетики Севера (ИФТПЭС) КНЦ РАН, директором которого был назначен к. т. н. Александр Александрович Папин. В 1991 г. в структуру института входили 3 отдела, 9 лабораторий, в том числе лаборатория нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (заведующий лабораторией к. т. н. В. А. Минин), которая продолжила исследования перспектив использования энергии ветра, Солнца, гидроэнергии малых рек, приливов и других возобновляемых источников в интересах потребителей Мурманской области. В августе того же года группа сотрудников ИФТПЭС (Аркадий Николаевич Данилин, Игорь Матвеевич Зархи, Валерий Андреевич Минин, Григорий Сергеевич Дмитриев) совершила поездку в Финляндию, в Институт технологии, г. Кеми. В ноябре 1991 г. финская сторона нанесла ответный визит и ознакомились с основными направлениями научных исследований ИФТПЭС, в том числе в области возобновляемой энергетики. По результатам обмена визитами был принят меморандум о намерениях на дальнейшее сотрудничество между двумя институтами.

В 1992 г. по заказу Минтопэнерго РФ был разработан технико-экономический доклад (ТЭД) по энергообеспечению ряда районов Мурманской области на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ). В рамках ТЭД были оценены потенциальные и технические ресурсы ветра, малых рек, Солнца, морских приливов и волн. Был рассмотрен вопрос резервирования нетрадиционных энергоустановок. Выявлены предпосылки использования НВИЭ в условиях рассматриваемого региона, определены первоочередные объекты для применения ветровых, солнечных, гидроустановок и др. Намечены основные направления рациональной стратегии освоения НВИЭ региона до 2000 г.

Налаживание международного сотрудничества

В начале 1990-х гг. лабораторией нетрадиционных и возобновляемых источников энергии ИФТПЭС были установлены контакты с Финским метеорологическим институтом. Результатом этих контактов явилось участие в работе международного семинара по ветроэнергетике в Финляндии, в г. Хетта, 10–13 февраля 1992 г., где сотрудники ИФТПЭС Валерий Андреевич Минин и Сергей Алексеевич Марчук сделали два доклада [19; 20]. В ходе работы семинара в Финляндии были установлены деловые контакты с учеными ряда европейских стран (Дании, Германии, Швеции и др.), получены ценные материалы: например, «Атлас ветроэнергетических ресурсов Европы» — результат многолетних исследований специалистов-метеорологов и ветроэнергетиков.

По результатам установленных контактов с зарубежными специалистами можно было констатировать, что развитие ветроэнергетики за рубежом представляет уже самостоятельную отрасль энергетики, вносящую в отдельных районах мира существенный вклад в производство электроэнергии. В России интерес к этой проблеме также значительно возрос. В то время НПО «Ветроэн» и завод «Ветроэнергомаш» осуществляли проектирование и изготовление традиционных крыльчатых ВЭУ мощностью до 100 кВт. Разработки в области создания более крупных ВЭУ велись в институте

«Гидропроект», КБ «Радуга», ЦАГИ и других организациях. Были выполнены разработки высокоэффективных ВЭУ крыльчатого типа мощностью 250–400 кВт, изготовлены опытные экземпляры таких ВЭУ. Проектировались ВЭУ мегаваттного класса с вертикальным ротором типа Дарье мощностью 1000 и 1500 кВт, испытывались их модели мощностью 200–250 кВт.

В 1992 г. Институт в рамках хоздоговора с «Колэнерго» выполнил «Оценку перспектив применения ветроэлектрических станций на Кольском полуострове». Были выявлены предпосылки, благоприятствующие крупномасштабному использованию ресурсов ветра, площадки для сооружения ВЭС, оценена возможная годовая выработка энергии установками типа Радуга-250, ГП-250, ГП-100/400 и Радуга-1 мощностью 250–1000 кВт. Предложены первоочередные площадки для сооружения ВЭС в районе Серебрянских и Териберских ГЭС.

В следующем году по заказу Минтопэнерго РФ был разработан ТЭД по энергообеспечению ряда районов Архангельской области с привлечением нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. В рамках ТЭДа были оценены потенциальные и технические ресурсы НВИЭ (ветра, малых рек, Солнца, морских приливов и волн и др.), выявлены предпосылки их использования и разработана рациональная стратегия их освоения на период до 2000 г. Результаты исследований в дальнейшем вошли в состав инновационной программы «Развитие нетрадиционной и малой энергетики России» Минтопэнерго РФ.

В 1993 г. Институт получил предложение со стороны европейских ученых и специалистов провести в Мурманске очередной международный семинар испытательных ветроэнергетических полигонов (Wind Test Stations). Предложение было принято, и такой семинар был проведен в Мурманске 13–15 сентября 1993 г. В семинаре приняли участие представители Германии, Дании, Швеции, Нидерландов, Шотландии, Греции. Было сделано около 30 докладов. В ходе этого мероприятия российские и зарубежные участники обменялись мнениями по вопросам организации измерений при испытаниях ВЭУ, сертификации ВЭУ, оптимизации их параметров и т. д.

Ведущими участниками семинара были: Генри Зайферт и Хельмут Клюг (Немецкий ветроэнергетический институт DEWI), Питер Йенсен (Датская национальная лаборатория RISO), Апостолас Фраголис (Греческий исследовательский центр по возобновляемой энергетике CRES), Павел Павлович Безруких — первый заместитель начальника Управления научно-технического прогресса Минтопэнерго РФ, Владимир Иванович Виссарионов — заведующий кафедрой гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Московского энергетического института, Валерий Андреевич Минин — заведующий лабораторией нетрадиционных и возобновляемых источников энергии Кольского научного центра РАН. Была совершена вертолетная поездка на ветроэнергетический полигон в пос. Дальние Зеленцы (рис. 7). Семинар завершился договоренностями о дальнейшем научно-техническом сотрудничестве.

В 1994 г. в рамках трехстороннего сотрудничества (Россия, Финляндия и Дания) был проведен научно-технический семинар “Kola Wind Workshop” (Кеми, Финляндия, 19–21 сентября 1994 г.), посвященный возможному использованию ветроэнергетических ресурсов Кольского полуострова. В семинаре приняли участие от российской стороны представители ИФТПЭС КНЦ РАН, Минтопэнерго РФ, АО «Колэнерго», администрация Мурманской области, консалтинговая фирма «Вятка»; от финской стороны — Арктикцентр и Центр по бизнесу и дизайну Лапландского университета, Министерство по торговле и промышленности Финляндии, Финский технологический институт; от датской стороны — Национальная лаборатория по ветроэнергетике «Рисё», ассоциация «Даруп». В работе семинара принял участие представитель генерального директората по науке, исследованиям и развитию Комиссии Европейского Сообщества д-р Камнинос Диамантарас.

По итогам работы семинара представителями упомянутых сторон был подписан ряд документов: меморандум по результатам переговоров, протокол о намерениях, протокол семинара и декларация сторон (Position paper) о последовательности шагов, направленных на практическую реализацию выработанных решений. Первым шагом явилось представление подписанных документов в декабре 1994 г. в Комиссию Европейского Сообщества для включения их в соответствующую программу (проект) по возобновляемым источникам энергии и получение финансовой поддержки.



Рис. 7. Участники международного семинара испытательных ветроэнергетических полигонов (Wind Test Stations), пос. Дальние Зеленцы, сентябрь 1993 г.

Fig. 7. Participants of the international seminar of wind power test sites, the settlement of Dalniye Zelentsy, September 1993

В 1994 г. было продолжено сотрудничество с Немецким ветроэнергетическим институтом DEWI (г. Вильгельмсхафен, Нижняя Саксония). Представитель ИФТПЭС, зав. лабораторией к. т. н. В. А. Минин, в июне посетил этот институт (рис. 8) и ознакомился с деятельностью его ветроэнергетического полигона, а также с крупным комплексом ВЭУ, работающих на побережье Северного моря, в том числе и однолопастных ВЭУ (рис. 9). Комплекс включал крупнейшую в то время в Европе ВЭУ AEOLUS-II мощностью 3000 кВт с ветроколесом диаметром 80 м, расположенным на высоте 92 м. С руководством Института DEWI была достигнута договоренность о продолжении сотрудничества и обмене опытом в области практического использования энергии ветра.

Во время своего визита В. А. Минин также принял участие в работе 2-й Немецкой ветроэнергетической конференции DEWEK'94 в Вильгельмсхафене, провел переговоры с заместителем директора Генри Зайфертом (см. рис. 8) и сделал стендовый доклад «Потенциал ветровой энергии Кольского полуострова и возможные направления его использования» [21].

В том же году сотрудники Института приняли участие еще в нескольких международных семинарах и конференциях.

На семинаре «Энергия ветра в районах с холодным климатом» (Финляндия, Пюхатунтури, 21–25 марта 1994 г.) были сделаны доклады: «Развитие ветроэнергетики в России» (П. П. Безруких, В. А. Минин, Г. С. Дмитриев и др.) [22]; «Потенциал Кольского полуострова и возможные направления его использования» (В. А. Минин, Г. С. Дмитриев) [23]; «Обоснование оптимальной мощности ветроустановок в комбинированных системах тепло- и электроснабжения» (В. А. Минин) [24].

На Международном семинаре «Кольский ветер» (Финляндия, Кеми, 19–21 сентября 1994 г.) сделан доклад «Ресурсы ветровой энергии Кольского полуострова и их использование» (В. А. Минин, Г. С. Дмитриев).



Рис. 8. Участники конференции DEWEK'94 В. Минин и Г. Зайферт
Fig. 8. Participants of the conference DEWEK'94 V. Minin and G. Seifert



Рис. 9. Однолопастные ветроэнергетические установки на полигоне в Вильгельмсхафене, Германия
Fig. 9. Single-bladed wind turbines at the test site in Wilhelmshaven, Germany

На Международном семинаре ветровых испытательных станций IMTS-94 (США, Колорадо, Боулдер, 12–13 сентября 1994 г.) были сделаны доклады «Кольская ветровая испытательная станция на побережье Баренцева моря» (В. А. Минин) [25]; «Потенциал ветровой энергии Кольского полуострова и возможные направления его использования» (В. А. Минин, Г. С. Дмитриев) [26]. Участники семинара (рис. 10) посетили ветроэнергетический полигон на территории национальной лаборатории по возобновляемым источникам энергии (NREL), ознакомились с установками и оборудованием, находящимися на испытаниях (рис. 11).



Рис. 10. Участники семинара IMTS-94 (США, Колорадо, Боулдер, сентябрь 1994 г.)
Fig. 10. Participants of the seminar IMTS-94 (Boulder, Colorado, USA, September 1994)



Рис. 11. Знакомство с оборудованием, проходящим испытания на полигоне:
слева — лопасть крупной ветроустановки, справа — ветроустановка с ферменной башней
Fig. 11. Learning the equipment being tested at the test site: on the left – the blade of the large wind turbine,
on the right —the wind turbine with a truss tower

Выполнение исследований по международному научно-техническому проекту «Кольский ветер» (Kola Wind)

В 1995 г. Институт продолжил двух- и многостороннее научно-техническое сотрудничество с зарубежными странами. В ходе рабочих встреч с представителями Финского технологического института (VTT) и Датской национальной лаборатории по ветроэнергетике (RISO) был сформирован пакет документов по научно-техническому проекту «Кольский ветер» (Kola Wind), который в марте 1995 г. был передан в Комиссию Европейского сообщества (Брюссель) для включения в Программу по неядерной энергетике “Joule-Thermie”. Кроме российской, датской и финской сторон участниками проекта были Немецкий ветроэнергетический институт (DEWI) и Греческий национальный центр по возобновляемым источникам энергии (CRES). Выполнение проекта Kola Wind предусматривало четыре этапа (предварительное изучение, подробное исследование возможностей использования энергии ветра на Кольском полуострове, создание пилотных демонстрационных ветроэнергетических установок и сооружение крупных ветропарков). Каждый этап должен заканчиваться оценкой результатов экспертами ЕС и принятием ими решения о целесообразности выполнения следующего этапа. В представленных в Комиссию ЕС документах стоимость проекта Kola Wind по первым двум этапам была оценена в 829 тыс. экю. Проект прошел предварительное рассмотрение в сентябре 1995 г. и получил одобрение экспертов ЕС. Окончательное положительное решение по проекту было принято в декабре 1995 г.

В 1996 г. были начаты исследования по проекту, направленные на изучение возможностей крупномасштабного использования энергии ветра на Кольском полуострове. Участниками проекта проведено семь рабочих встреч (две в Мурманске (рис. 12), три в Хельсинки, в Москве и в Саариселке, Финляндия). На встрече в Саариселке в ходе семинара BOREAS III были сделаны доклады [27; 28], имеющие прямое отношение к проекту «Кольский ветер».



Рис. 12. Участники проекта «Кольский ветер» в белом зале АО «Колэнерго».

Слева направо: В. А. Минин, Г. С. Дмитриев, Е. Пельтола, Е. Петерсен, П. Лундсагер, В. А. Семёнов

Fig. 12. Participants of the Kola Wind project in the white hall of Kolenergo JSC.

From left to right: V. A. Minin, G. S. Dmitriev, E. Peltola, E. Petersen, P. Lundsager, V. A. Semyonov

По итогам работы на первом этапе (предварительное изучение) был составлен и передан в Комиссию ЕС научный отчет «Предварительное изучение возможности местного и регионального использования энергии ветра на Кольском полуострове, Мурманская область, Россия» (“A Feasibility

Study to Develop Local and Regional Use of Wind Energy on the Kola Peninsula, Murmansk Region, Russia”). Авторы от финской стороны: И. Пельтола, Й. Вульф, Ю. Рантанен, А. Пельтомаа; от российской стороны: В. Минин, Г. Дмитриев; от датской стороны: П. Ам, П. Лундсагер, Л. Ландберг.

В отчете были представлены цель проекта и задачи, решаемые на отдельных его стадиях, изложены предварительные оценки по перспективам применения ВЭУ для электро- и теплоснабжения как автономных потребителей, так и потребителей, охваченных централизованным энергоснабжением. Предварительно были намечены площадки для сооружения ВЭУ. Сформулированы задачи для выполнения последующей стадии проекта. Отчет был одобрен экспертами Комиссии ЕС.

В сентябре 1996 г. рабочая встреча по проекту «Кольский ветер» состоялась в Дании, в Орхусе. Ее организатором был Питер Ам (рис. 13). Осенью 1997 г. сотрудники ИФТПЭС В. А. Минин и Г. С. Дмитриев были приглашены в Грецию для ознакомления с работой комбинированной ветродизельной электростанции. Такая электростанция была создана на острове Айос-Эфстратиос в Ионическом море (рис. 14).



Рис. 13. Участники рабочей встречи в Орхусе (Дания)
Fig. 13. Participants of the work meeting in Aarhus (Denmark)



Рис. 14. Комбинированная ветродизельная электростанция на о. Айос-Эфстратиос, Греция
Fig. 14. A wind-diesel hybrid power plant on the island of Agios Efstratios, Greece

В 1998 г. исследования по проекту «Кольский ветер» (Kola Wind), включенному в Европейскую программу по неядерной энергетике JOULE III, были продолжены. Российская сторона (ИФТПЭС КНЦ РАН) получала финансовую поддержку по этому проекту из европейской программы INCO-COPERNICUS. В результате выполненных исследований был разработан «Атлас ветра Кольского полуострова», который пополнил «Атлас ветра Европы» (European Wind Atlas). Этим были заложены основы для сотрудничества в области освоения ресурсов ветра в Евро-Арктическом регионе. По результатам выполнения проекта были подготовлены два отчета [29; 30], которые были переданы в Комиссию ЕС и получили одобрение, а также монография [31] и статьи [32; 33].

В последующие годы сотрудники ИФТПЭС приняли участие в работе:

- европейской конференции по ветроэнергетике (European Wind Energy Conference) в г. Ницце, Франция, 1–5 марта 1999 г. Было сделано два доклада [34; 35];
- международного симпозиума ISCORD 2000 по проблемам устойчивого развития в холодных регионах (Хобарт, Тасмания, Австралия, 31 января — 6 февраля 2000 г.) [36];
- международного семинара по производству ветровой энергии в районах с холодным климатом (BOREAS V), г. Леви, Финляндия, 29 ноября — 1 декабря 2000 г. [37].

В 2000 г. в России был издан «Атлас ветров России» [38]. В его разработке приняли участие представители Главной геофизической обсерватории (ГГО), Минтопэнерго РФ, Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ), Национальной картографической корпорации,

Российско-датского института энергоэффективности (РДИЭЭ) и Датской национальной лаборатории RISO. Свой вклад в разработку атласа внесли и сотрудники ИФТПЭС КНЦ РАН В. А. Минин и Г. С. Дмитриев.

Центр является учредителем и научным членом Всемирной ветроэнергетической ассоциации (WWEA). На состоявшейся в ноябре 2005 г. в Мельбурне, Австралия, 4-й Всемирной Ветроэнергетической конференции были представлены три пленарных доклада Центра [39–41], которые вызвали значительный интерес со стороны участников конференции. Представитель Центра с. н. с. Г. С. Дмитриев был вторично переизбран вице-президентом WWEA.

В 2005 г. заведующий лабораторией В. А. Минин в составе сводной рабочей группы принял участие в разработке Концепции использования ветровой энергии в России [42].

Перспективы крупномасштабного применения ВЭУ в составе энергосистемы

Основными предпосылками крупномасштабного применения ВЭУ в составе Кольской энергетической системы являются: высокий потенциал ветра, благоприятный годовой ход ветра с максимумом в холодное время года, наличие господствующих направлений ветра и уникальная структура энергосистемы [43]. В составе Кольской энергосистемы работают Кольская АЭС (1760 МВт), 17 гидроэлектростанций (около 1600 МВт) с водохранилищами суточного, сезонного и многолетнего регулирования, а также Мурманская и Апатитская ТЭЦ (около 250 МВт). Наличие ГЭС позволяет компенсировать неравномерность поступления энергии от ВЭУ в энергосистему. Благодаря этому оказывается возможным сглаживание колебаний мощности ВЭУ (минутных, часовых, суточных) и превращение непостоянной во времени ветровой энергии в достаточно качественную экологически чистую энергию.

Разработка экономико-математической модели оптимизации структуры Кольской энергосистемы и последующие расчетные исследования показали, что масштабы возможного внедрения ВЭУ могут составить около 15 % в балансе мощности системы (около 600 МВт) и около 10 % в балансе энергии (2 млрд кВт·ч). Столь значительные масштабы возможного внедрения ВЭУ требуют изменения существующих правил сработки и наполнения водохранилищ ГЭС: водохранилища нужно готовить не только к приему паводковых (весенних и осенних) вод, но и к возможности аккумулирования энергии ветра в осенне-зимний период.

Практическая значимость исследований заключается в разработке эффективного и простого в реализации инструмента технико-экономической оценки перспектив применения ВЭУ в зависимости от складывающихся внешних условий (стоимости топлива, тарифов на электрическую и тепловую энергию, стоимости ВЭУ и т. д.).

В дальнейшем сотрудниками Центра была выполнена оценка перспектив освоения ресурсов ветровой энергии на Кольском полуострове [43], инвестиционной привлекательности сооружения ветропарков [44], возможного влияния ветропарков на режимы работы энергосистем [45].

Было установлено, что ветроэнергетические установки и отдельные ВЭУ, работающие в составе мощной энергосистемы, должны:

- преобразовывать переменную во времени энергию ветра в электрическую энергию заданного качества за счет выбора соответствующих устройств, позволяющих вести устойчивую работу в широком диапазоне скоростей ветра;

- работать с высоким коэффициентом использования энергии ветра;
- осуществлять автоматический запуск ВЭУ;
- позволять вести параллельную работу нескольких ВЭУ.

В ходе проведенных исследований были оценены достоинства и недостатки применения на ветроэнергетических установках синхронных и асинхронных генераторов. Синхронные генераторы позволяют осуществлять выработку реактивной мощности наряду с активной, а также вести работу в режиме синхронного компенсатора. Их недостаток — сложность реализации синхронизации с сетью, более высокая стоимость, чем у асинхронных генераторов.

Асинхронные генераторы находят довольно широкое применение за рубежом. В России также были разработаны опытные образцы ВЭУ с асинхронными генераторами. Их применение обеспечивает простоту и надежность конструкции, возможность работы в двигательном режиме для прямого пуска ВЭУ от сети. Недостатками являются потребление реактивной мощности из сети и возможность регулирования напряжения только с применением специальных устройств. Запуск ВЭУ в работу осуществляется путем перевода генератора в двигательный режим. Для остановки ВЭУ применяется рекуперативное торможение.

В начале 2000-х гг. в ходе контактов с Норвежским обществом охраны природы (Norges Naturvernforbundet) были организованы наблюдения за скоростью и направлением ветра и сформулировано предложение по сооружению в Мурманске вблизи гостиницы «Огни Мурманска» на высоте около 200 м над уровнем моря демонстрационной ВЭУ мощностью 250 кВт. Энергию от ВЭУ планировалось использовать для энергоснабжения гостиницы. Было достигнуто соглашение с АО «Колэнерго» о параллельной работе этой ВЭУ (рис. 15) в составе электрической сети Мурманска, что позволяло выдавать избытки энергии в сеть при сильном ветре и, наоборот, заимствовать энергию из сети в случае ослабления ветра.



Рис. 15. Сетевая ветроэнергетическая установка Wincon-200 мощностью 200 кВт вблизи г. Мурманска, введенная в эксплуатацию в 2001 г.

Fig. 15. The Wincon-200 on-grid wind turbine with a capacity of 200 kW near Murmansk, commissioned in 2001

В 2001 г. на финансовые средства норвежской стороны в Дании была приобретена ВЭУ Wincon-200 мощностью 200 кВт и транспортирована в Россию. В ноябре того же года она была запущена в эксплуатацию и в течение 20 лет участвовала в энергоснабжении названного гостиничного комплекса. Сооружение этой ВЭУ положило начало промышленному освоению ветровой энергии в Мурманской области и последовательному развитию системной ветроэнергетики в регионе.

Благодаря установленным контактам с Норвежским обществом охраны природы была организована поездка в Норвегию, в ходе которой сотрудники ИФТПЭС Г. С. Дмитриев и В. А. Минин посетили ветропарк «Викна» (рис. 16, а, б), расположенный на открытом побережье Атлантики. На территории ветропарка установлены три ветроустановки мощностью 400 кВт и две мощностью 500 кВт. Всего 2200 кВт. В ходе визита удалось провести не только внешний осмотр ветроустановок, но и подняться наверх мачты в гондолу, где расположены редуктор и генератор (рис. 16, в), ознакомиться с их работой.



Рис. 16. Ветропарк «Викна» в Норвегии:

a — общий вид; *б* — подъезд к ветропарку; *в* — проведение наладочных работ внутри гондолы ВЭУ, расположенной на высоте около 40 м

Fig. 16. The Vikna Wind Farm in Norway:

a — a general view, *б* — an access road to the wind farm, *в* — carrying out adjustment work inside the wind turbine nacelle located at a height of about 40 m

В начале 2000-х гг. ЦФТПЭС продолжил укрепление научных связей с зарубежными партнерами. Центр посетил Президент Всемирной ассоциации ветроэнергетики (WWEA) Пребен Маггаард (рис. 17), состоялась встреча с представителями Центра. Старший научный сотрудник Г. С. Дмитриев в дальнейшем был избран одним из вице-президентов названной выше Всемирной ассоциации ветроэнергетики.

В 2001 г. Центр посетил Езаки Такеми, профессор университета г. Фукуока, Япония (Ezaki Takemi, University of Fukuoka, Japan). Цель визита — достижение с руководством Центра (рис. 18) договоренности о проведении в Мурманской области испытаний и мониторинга изобретенной им ветровой турбины.

В ходе дальнейших исследований Центра в области системной ветроэнергетики [45–48], было установлено, что верхние водохранилища пяти из шести каскадов ГЭС Кольской энергосистемы обладают емкостью, достаточной как для ведения многолетнего регулирования на ГЭС, так и для участия в выравнивании непостоянства поступления энергии от ВЭС. Благоприятными возможностями для аккумулирования энергии в интересах ветроэнергетики характеризуются водохранилища Верхне-Териберской ГЭС (напор 113 м), Верхне- и Нижне-Серебрянской ГЭС (76 и 62 м), Верхне-Тулумской ГЭС (55 м), Кумской, Иовской и Князегубской ГЭС (32, 32 и 37 м). Большая полезная емкость водохранилищ обеспечивает возможность создания значительных энергозапасов, а высокие напоры делают каждый сэкономленный и запасенный за счет применения ВЭУ кубометр воды весьма энергоэффективным.



Рис. 17. Президент Всемирной ассоциации ветроэнергетики (WWEA) Пребен Маегаард (справа) в г. Апатиты.
Слева от него — Н. Н. Дмитриева, Г. С. Дмитриев и сопровождающие лица
Fig. 17. President of the World Wind Energy Association (WWEA) Preben Maegaard (on the right) in Apatity.
To his left —N. N. Dmitrieva, G. S. Dmitriev and accompanying persons



Рис. 18. Встреча Езаки Такеми с директором ЦФТПЭС Борисом Васильевичем Ефимовым
и с. н. с. Григорием Сергеевичем Дмитриевым
Fig. 18. Ezaki Takemi meets with the director of NERC B. V. Efimov and a senior researcher G. S. Dmitriev

В целях оптимизации режимов совместной работы ветро- и гидроэлектростанций нужно внести изменения в правила и принципы сработки и наполнения водохранилищ ГЭС, учитывающие, что готовить водохранилища следует не только к приему паводковых вод (гидроэнергоресурсов), но и к приему осенне-зимнего максимума энергии ветра (ветроэнергоресурсов).

Выше было отмечено, что в 2001 г. под Мурманском в составе энергосистемы начала работать ВЭУ мощностью 200 кВт. Дальнейшие работы в этом направлении были сосредоточены на выявлении в прибрежных районах Кольского полуострова других площадок для размещения ветропарков мощностью от 10–15 до 200 МВт.

Системную ветроэнергетику целесообразно развивать в первую очередь там, где высок потенциал ветра, имеются дороги для доставки ВЭУ, выход в энергосистему. Предпочтительно, чтобы такой район был вблизи действующих или строящихся гидроэлектростанций. На Кольском полуострове этим требованиям отвечает прибрежный район, охватывающий Серебрянские и Териберские ГЭС (рис. 19). Этот район располагает повышенным потенциалом ветра, охвачен автомобильными дорогами и электрическими сетями. Суммарная мощность четырех упомянутых ГЭС составляет 510 МВт. Исследования показали, что вблизи этих ГЭС можно разместить несколько ветропарков суммарной мощностью около 500 МВт [49; 50].



Рис. 19. Первоочередные ветропарки (1–4) вблизи Серебрянских и Териберских ГЭС
Fig. 19. Priority wind farms (1–4) near Serebryansk and Teriberka hydroelectric power plants

Выдача мощности и энергии от ветропарков возможна по существующим линиям электропередачи напряжением 150 и 330 кВ. Во избежание перегрузки ЛЭП выдача энергии может осуществляться в компенсационном режиме, то есть со снижением мощности ГЭС при устойчивом сильном ветре. Благодаря этому в водохранилище может накапливаться дополнительный запас воды, линии электропередачи не перегружаются, а система «ветропарки + ГЭС» приобретает более базисные эксплуатационные характеристики. При этом равномерность загрузки ЛЭП возрастает, что повышает их экономическую эффективность.

Водохранилища Серебрянского и Териберского каскадов ГЭС обладают объемами, достаточными для ведения годового регулирования. Верхние электростанции обоих каскадов являются регулируемыми и самыми высоконапорными в Кольской энергосистеме (76 м и 113 м), что делает каждый сэкономленный в них кубометр воды весьма энергоэффективным.

При выборе места для размещения ветропарков учитывался потенциал ветра, наличие подъездных путей и начальной инфраструктуры, мест базирования персонала и монтажной техники, близость к существующим электрическим сетям. В итоге выбраны следующие первоочередные площадки для сооружения ветропарков:

- площадка вблизи пос. Лодейное — для сооружения ветропарка мощностью около 10 МВт (поз. 1 на рис. 19), расположена в 8 км от Нижне-Териберской ГЭС (26 МВт);
- площадка на берегу Териберского водохранилища — для сооружения ветропарка мощностью 15–20 МВт (поз. 2 на рис. 19). Расположена вблизи благоустроенной автомобильной дороги и стационарных сооружений Верхне-Териберской ГЭС (130 МВт);
- площадка в районе пос. Туманный — для сооружения ветропарка мощностью 50 МВт (поз. 3 на рис. 19). Располагается вдоль дороги, идущей от пос. Туманный к Нижне-Серебрянской ГЭС (156 МВт). Близкое расположение к подстанции ГЭС делает удобной выдачу мощности парка в энергосистему короткой кабельной или воздушной линией;
- площадка в районе 81 км автодороги Мурманск — Териберка — для сооружения ветропарка мощностью 200 МВт (поз. 4 на рис. 19). Вырабатываемая энергия может выдаваться на близлежащую подстанцию Верхне-Серебрянской ГЭС (205 МВт).

На рисунке 20 представлен план последнего ветропарка, расположенного в 40 км от Баренцева моря на возвышенности с высотными отметками 240–300 м над уровнем моря. Ориентировочное значение среднегодовой скорости ветра в этом районе составляет 6,3 м/с. Трансформаторная подстанция, пригодная для присоединения этого ветропарка к энергосистеме, расположена примерно в 30 км от Серебрянской ГЭС-1. Изначально на выбранной площадке планировалось разместить 100 ВЭУ мощностью 2 МВт каждая. В качестве прототипа рассматривалась современная ВЭУ Vestas V80 с диаметром ветроколеса 80 м и высотой башни 70 м, производимая в Германии.

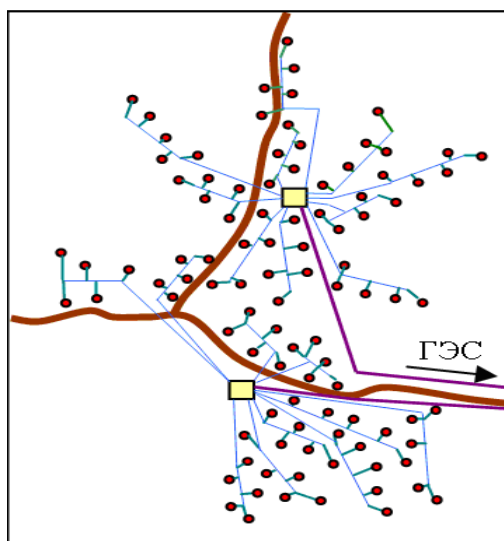


Рис. 20. План ветропарка мощностью 200 МВт в районе 81-го км автодороги Мурманск — Териберка
Fig. 20. The plan of a wind farm with a capacity of 200 MW in the area of 81 km of the Murmansk — Teriberka highway

В дальнейшем к последней площадке проявила интерес компания ПАО «Энел Россия», которая в 2017 г. выиграла тендер на сооружение здесь Кольской ВЭС мощностью 201 МВт. Объем инвестиций, необходимых для реализации проекта, составил около 270 млн евро. Ориентировочная выработка электроэнергии ветропарка — 750 млн кВт·ч в год. Правительство Мурманской области и ПАО «Энел Россия» в 2018 г. заключили соглашение о сотрудничестве в реализации этого инвестиционного проекта в 2019–2021 гг. Было установлено 57 ВЭУ типа Siemens Gamesa 3.X (рис. 21). Мощность каждой ВЭУ составляет 3,55 МВт, высота башни 84 м, диаметр ветроколеса 132 м. Фактический запуск ветропарка в работу состоялся в декабре 2022 г. Выработка электроэнергии за первый год эксплуатации (2023 г.) составила 497 млн кВт·ч.



Рис. 21. Кольская ветроэлектрическая станция
Fig. 21. The Kola wind power plant

Энергоснабжение удаленных децентрализованных потребителей с использованием энергии ветра

Результаты исследования перспектив использования энергии ветра для энергоснабжения удаленных потребителей Мурманской области опубликованы в работах [51–55]. Установлено, что для работы электро- и теплогенерирующих установок малой мощности (дизельных электростанций, бензиновых агрегатов, котельных установок и т. п.) в качестве топлива используются мазут, дизтопливо, бензин, уголь, местное древесное топливо, иногда сжиженный баллонный газ. Способы доставки топлива децентрализованным потребителям разнообразны. Они зависят от специализации потребителей, удаленности баз топливоснабжения, состояния дорожно-транспортной сети. Для доставки топлива в прибрежные населенные пункты чаще всего используется водный морской транспорт. В период летней навигации завозится годовой запас топлива. В глубинные районы Кольского полуострова при отсутствии дорог топливо доставляется бездорожным транспортом, санно-тракторными поездами, авиацией.

Из-за высоких транспортных расходов на местный распределительный транспорт затраты на топливо могут возрастать: при перевозках автотранспортом по морю — в 1,3–1,8 раза, а при использовании авиации — в 3 раза и более по отношению к отпускной цене на опорных базах топливоснабжения.

На дизельных электростанциях обычно стремятся к экономному расходованию моторесурса двигателей и ограничивают время их работы в течение суток. В результате число часов использования установленной мощности ДЭС находится на довольно низком уровне — всего 1000–2000 часов в год. Удельные расходы топлива на ДЭС довольно высоки и составляют 440–500 г у. т/кВт·ч, что соответствует к. п. д. 25–30 %. Дороговизна топлива и неоптимальные режимы работы электростанций сказываются на себестоимости вырабатываемой электроэнергии, которая достигает 25–35 руб/кВт·ч и выше.

Теплоснабжение удаленных потребителей зачастую производится от обычных печей с использованием дров. Иногда используются небольшие котельные мощностью от 50 до 500 кВт, работающие на угле или жидком топливе. В силу малых мощностей, технико-экономические показатели таких источников находятся на низком уровне. При числе часов использования в году установленной мощности 3000–3500, удельном расходе топлива 250–270 кг у. т/Гкал, штатном коэффициенте около 30 чел/Гкал себестоимость тепловой энергии оказывается довольно высокой — 30–35 тыс. руб/Гкал.

Для улучшения сложившейся ситуации нужно повысить полноту полезного использования топлива, осуществить энергосберегающие мероприятия, расширить объемы использования местных топливных ресурсов, возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра и гидроэнергия малых рек [51–54].

Мурманская область располагает высоким потенциалом ветра, особенно в прибрежных районах Баренцева и Белого морей. Среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м составляют в этих районах 6–8 м/с. Число часов использования в году установленной мощности ВЭУ достигает 3000–4000 ч.

Предпосылками для успешного применения ВЭУ являются: высокий потенциал ветра, совпадение сезонного максимума интенсивности ветра в зимнее время с максимумом потребности в электрической и тепловой энергии, взаимодополняющий характер сезонного поступления ветровой энергии и энергии рек. Использование ветровой энергии для электроснабжения децентрализованных потребителей и участие ВЭУ в теплоснабжении потребителей представляются весьма перспективными.

На Кольском полуострове имеет место длинный отопительный сезон (около 9 месяцев), зимний максимум скоростей ветра совпадает с максимумом потребности в тепловой энергии. Применение ВЭУ позволяет превратить ветер из климатического фактора, определяющего повышенные теплопотери, в полноценный источник энергии, обеспечивающий именно в эти периоды активное поступление энергии на нужды отопления. При таком использовании ветра на отопление не обязательны высокие требования к качеству энергии, вырабатываемой ВЭУ. Непостоянство ветра сглаживается за счет аккумулирующей способности самой системы теплоснабжения и отапливаемых зданий, а также резервной котельной.

Расчеты, выполненные применительно к ветровым условиям побережья Баренцева моря, показали, что оптимальной является мощность ВЭУ около 0,5–0,7 от мощности котельной. Применение ВЭУ способствует снижению приведенных затрат и себестоимости вырабатываемой тепловой энергии на 20–35 % и вытеснению до 50–70% органического топлива, расходуемого котельной.

Для выполнения технико-экономической оценки перспектив использования ветровой энергии для энергоснабжения децентрализованных потребителей была разработана методика, базирующаяся на расчете приведенных затрат. Ее применение показало, что наращивание мощности ВЭУ в целях увеличения экономии топлива целесообразно до определенного предела, соответствующего минимуму приведенных затрат, после которого излишние капиталовложения начинают брать верх над эффектом от экономии топлива, и суммарные затраты возрастают.

Дополнительная оценка технико-экономической эффективности на основе определения чистого дисконтированного дохода (ЧДД) позволила оценить возможности снижения тарифов на электрическую и тепловую энергию за счет применения ВЭУ. Установлено, что в ветровых условиях побережья Баренцева моря дисконтированный срок окупаемости ВЭУ составляет 5–6 лет. По истечении этого срока тарифы на электрическую и тепловую энергию могут быть снижены на 50 %. На побережье Белого моря эти показатели несколько ниже — около 25–30 %.

В числе первоочередных потребителей, перспективных для применения ВЭУ, можно назвать населенные пункты Цып-Наволоки, Остров Харлов и Терско-Орловский, в которых находятся метеостанции и маяки. Площадки для ВЭУ мощностью около 20 кВт имеются в непосредственной близости от указанных объектов и имеют высокую степень открытости на местности. Вблизи пограничных застав Гаврилово и Восточная Лица на побережье Баренцева моря есть подходящие площадки для размещения ВЭУ мощностью около 100 кВт. Наконец, для сёл Чаваньга и Чапома на южном побережье Кольского полуострова могут быть предложены ВЭУ мощностью 250 кВт. Площадки для них расположены на близлежащих возвышенностях с отметками около 20 м над уровнем моря.

В 2004 г. были изучены перспективы использования энергии ветра и стока реки Вудъяврйок для электроснабжения Полярно-альпийского ботанического сада-института КНЦ РАН, расположенного в Хибинском горном массиве в районе г. Кировска [55]. По итогам этого исследования выбрана площадка для сооружения ВЭУ мощностью 150 кВт, способной покрыть годовую

потребность сада в электроэнергии в объеме 0,3–0,4 млн кВт·ч. Осуществлен выбор створа для малой ГЭС на реке Вудъяврйок, протекающей через территорию Ботанического сада. Предложен вариант строительства ГЭС с плотиной 6 м и деривационным водоводом длиной примерно 1 км, обеспечивающими суммарный напор 20 м. Выполнена технико-экономическая оценка вариантов строительства ВЭУ и малой ГЭС.

Говоря о состоянии и перспективах развития малой автономной ветроэнергетики, можно отметить, что в пос. Молочный недалеко от Мурманска на страусиной ферме (ООО «Северное сияние») с 2013 г. эксплуатируется ВЭУ марки Vetrox мощностью 5 кВт [56]. Трехлопастная ветроустановка имеет диаметр ветроколеса 6,2 м, высоту башни 11,5 м. Получаемая энергия используется для отопления производственного помещения фермы. В 2014 г. в Новой Титовке установлено три ВЭУ Vetrox мощностью по 3 кВт каждая (диаметр ветроколеса 3 м). Вырабатываемая энергия используется на нужды электроснабжения «Дайвинг центра».

Также в 2014 г. в селе Пялица на южном побережье Кольского полуострова был реализован первый проект в рамках модернизации систем электроснабжения отдаленных сёл Мурманской области. Итогом проекта стал запуск ветродизельносолнечной электростанции, которая включает в себя четыре ВЭУ мощностью по 5 кВт, два дизель-генератора по 30 кВт и 60 солнечных панелей общей мощностью 15 кВт (рис. 22). В 2016 г. подобные электростанции начали работать еще в трех сёлах, там же, на побережье Белого моря. Это позволило обеспечить круглосуточное электроснабжение сёл, запустить работу интернета и сотовой связи. Все проекты были осуществлены с привлечением средств областного бюджета.



Рис. 22. Гибридная ветродизельносолнечная установка в с. Пялица на южном побережье Кольского полуострова. Введена в эксплуатацию в 2014 г.

Fig. 22. A wind-diesel-solar hybrid power system in the village of Pyalitsa on the southern coast of the Kola Peninsula. It was commissioned in 2014

На V межрегиональной научно-промышленной выставке «Инновации. Производство. Рынок», проходившей 24–26 октября 2007 г. в выставочном комплексе Ярославского ЦНТИ, инновационный проект «Энергия ветра — перспективный энергоресурс Мурманской области», представленный В. А. Мининым и Г. С. Дмитриевым, был награжден бронзовой медалью. В том же году за вклад в развитие научно-промышленного комплекса России и активное участие в XII Международной выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции», проходившей 2–5 октября 2007 г. в Санкт-Петербурге, Центр удостоен диплома II степени с вручением серебряной медали в номинации «Лучший инновационный проект в области топлива и энергетики».

Разработка комплексной целевой программы «Развитие нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Мурманской области» на 2009–2015 гг.

Разработанная в 2008 г. программа была направлена на диверсификацию приходной части топливно-энергетического баланса региона, повышение его энергетической безопасности и снижение зависимости от внешних поставок топлива. Программа предполагала освоение нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Мурманской области по нескольким наиболее значимым направлениям [57–61]. В первую очередь, это крупномасштабное использование высокопотенциальных ветроэнергетических ресурсов региона в составе Кольской энергосистемы. Для реализации данного направления в программе предусмотрен выбор площадок для сооружения ветропарков, отработка режимов их совместной работы с другими электростанциями энергосистемы, последовательное долгосрочное развитие системной ветроэнергетики. Ожидалось, что в реализации этого направления примут участие «Газпром», «Росатом», ТГК-1, некоторые заинтересованные зарубежные фирмы.

Программа предусматривала рассмотрение вопросов участия ВЭУ в электроснабжении удаленных децентрализованных потребителей (метеостанций, маяков, рыболовецких колхозов, объектов Северного флота, пограничной службы и т. д.).

Отдельным разделом в программе были выделены мероприятия по использованию энергии ветра на нужды отопления. В условиях длительного отопительного сезона, имеющего место в Заполярье, и дороговизны привозного органического топлива это направление заслуживает особого внимания. Практическая и экономическая целесообразность участия ВЭУ в теплоснабжении потребителей Севера была подтверждена на ветроэнергетическом полигоне КНЦ РАН в пос. Дальние Зеленцы на побережье Баренцева моря.

Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей

Были рассмотрены перспективы использования ветра на нужды теплоснабжения, оценены объемы возможного вытеснения органического топлива за счет применения ВЭУ. Основные результаты выполненных исследований изложены в работах [62–65]. В них рассмотрены возможности участия ВЭУ в теплоснабжении таких удаленных рассредоточенных потребителей Арктики, как метеостанции, маяки, пограничные заставы, объекты армии и флота и др. Необходимость в функционировании перечисленных потребителей сохраняется на дальнюю перспективу. Было оценено состояние теплоснабжения потребителей региона, изучен потенциал ветровой энергии Мурманской области, выполнена технико-экономическая оценка совместной работы котельных с ВЭУ.

В прибрежных районах западного сектора Арктической зоны России (побережье Баренцева, Белого и Карского морей) складываются благоприятные предпосылки для эффективного использования ветровой энергии. Среднегодовые скорости ветра в условиях открытой ровной местности на высоте 10 м в указанных районах составляют 6–8 м/с. Повсеместно в зимний период имеет место сезонный максимум интенсивности ветра, который совпадает с максимумом потребности в тепловой энергии со стороны потребителей. На примере объектов, расположенных в прибрежной зоне Кольского полуострова, показано, что при внедрении ветроэнергетических установок можно сэкономить значительное количество привозного топлива, сжигаемого на котельных установках, и снизить за счет этого себестоимость вырабатываемой тепловой энергии на 25–40 %. Эти показатели могут быть дополнительно увеличены за счет внедрения аккумуляторов теплоты.

Режимы совместной работы котельной, ветроэнергетической установки и аккумулятора теплоты в ветровых условиях побережья Баренцева моря можно проследить по рис. 23, а, где представлен график отопительной нагрузки (жирная ступенчатая линия), определяемый перепадом внутренней и наружной температур воздуха, а также поправкой на ветер. Голубым цветом на рисунке показана выработанная и вписавшаяся в график нагрузки энергия от ВЭУ. Красным цветом выделена энергия, выработанная котельной, которая замыкает покрытие потребностей в тепле.

Желтым цветом показана избыточная энергия, выработанная ВЭУ. Все построения на графике охватывают самое холодное время года (период с декабря по март). Максимальная тепловая нагрузка имела место в самую холодную пятидневку в феврале.

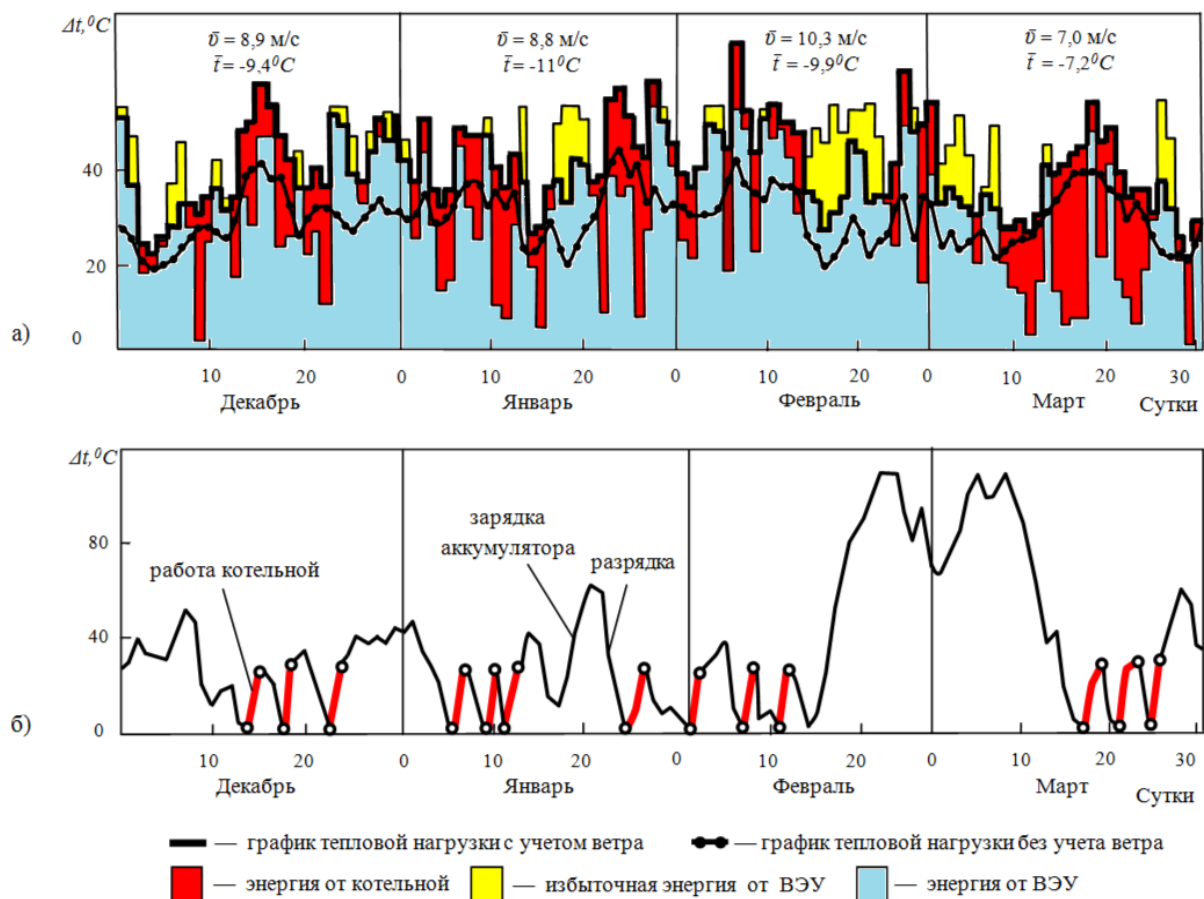


Рис. 23. Покрывение отопительной нагрузки в декабре-марте комплексом «ВЭУ + котельная» (а) и возможная работа теплового аккумулятора (б)
Fig. 23. Covering the heating load in December-March with the complex “wind turbine + boiler house” (a) and possible operation of a thermal battery (b)

Была выполнена оценка технико-экономической эффективности внедрения ВЭУ в системы теплоснабжения удаленных потребителей Арктики. Она показала, что с финансовой точки зрения внедрение ВЭУ является оправданным. К завершению планового срока службы ВЭУ может быть сформирована дополнительная прибыль, достигающая половину суммы первоначальных инвестиций.

В качестве конкретного примера была оценена технико-экономическая эффективность внедрения ВЭУ около с. Териберка, расположенного на побережье Баренцева моря и обеспечиваемого тепловой энергией от котельной. Основным видом топлива котельной является мазут. Стоимость мазута на рынке постоянно растет, что приводит к увеличению тарифа на тепловую энергию. Для повышения эффективности системы теплоснабжения предлагалось совместно с котельной использовать ветроэнергетические установки. Внедрение ВЭУ дает возможность уменьшить участие котельной в покрытии графика отопительной нагрузки и снизить потребление мазута.

В качестве критерия прибыльности сооружения ВЭУ использовалась величина чистого дисконтированного дохода (рис. 24), которая выражает суммарный экономический эффект, получаемый от реализации объекта в течение всего срока его службы с учетом изменения уровня инфляции и тарифа на тепловую энергию.

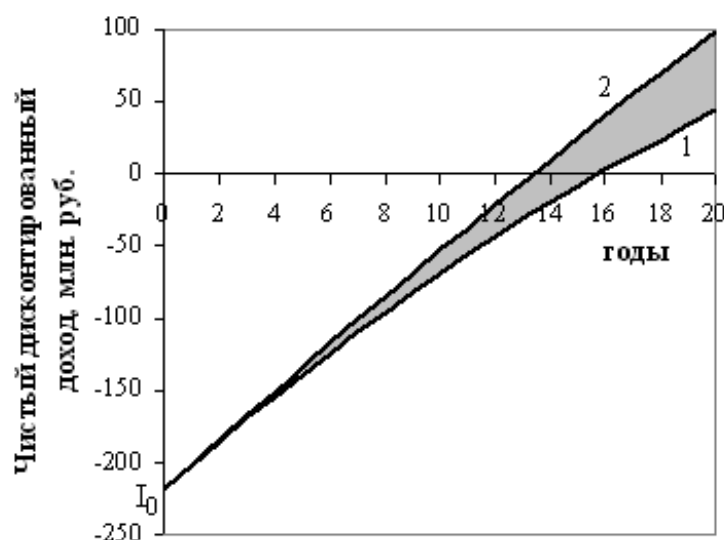


Рис. 24. Формирование чистого дисконтированного дохода при совместной работе ВЭУ и котельной:
1, 2 — соответственно сооружение ВЭУ без получения кредита и на кредит в банке

Fig. 24. The formation of net present value during joint operation of a wind turbine and boiler house:
1 and 2 — the construction of a wind turbine without obtaining a loan and for a loan from a bank respectively

Перспективы включения НВИЭ в топливно-энергетический баланс Мурманской области

Топливо-энергетический баланс Мурманской области долгие годы формировался посредством привозного топлива (угля, нефтепродуктов, ядерного горючего), которое используется для выработки тепловой и электрической энергии. Часть энергетических потребностей региона удовлетворяется за счет местных гидроэнергетических ресурсов: на 17 ГЭС вырабатывается ежегодно около 6 млрд кВт·ч электроэнергии (около 40 % годового потребления). Однако в целом зависимость региона от внешних поставок топлива сохраняется достаточно высокой.

В то же время Мурманская область располагает широким набором нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (ветра, Солнца, малых рек, морских приливов, волн и др.), которые в определенных условиях могут составить конкуренцию традиционным источникам энергии или выгодно дополнить их. Исследования показали, что с точки зрения экономической эффективности из перечисленных источников на передний план выдвигаются энергия ветра и гидроэнергия малых рек. Предпосылками, благоприятствующими применению ветроэнергетических установок в прибрежных и горных районах Мурманской области, являются высокий общий потенциал ветра и его зимний максимум, совпадающий с возрастающими потребностями в энергии и находящийся в противофазе с сезонным изменением стока рек. Наличие в энергосистеме 17 ГЭС и их способность компенсировать непостоянство поступления энергии ветра создают на Кольском полуострове уникальные условия для крупномасштабного использования ветроэнергетических ресурсов региона. Перспективными направлениями развития ветроэнергетики на Кольском полуострове являются: работа ветропарков в составе энергосистемы; участие ВЭУ в электро- и теплоснабжении различных категорий автономных потребителей. Малые гидроэлектростанции также смогут найти достойное место в энергетике региона.

Вовлечение в оборот местных нетрадиционных и возобновляемых источников энергии может помочь диверсифицировать приходную часть топливно-энергетического баланса региона. Выполненные исследования показали, что к 2030 г. можно покрыть потребности региона на 9–10 % за счет использования НВИЭ, поднять благодаря этому уровень его энергетической независимости, снизить зависимость от внешних поставок топлива, улучшить экологическую ситуацию [66; 67].

Перспективы крупномасштабного использования энергии ветра для производства экологически чистого топлива — водорода

Прибрежные районы Кольского полуострова располагают высоким потенциалом ветра. Ресурсы ветровой энергии могут быть использованы для производства экологически чистого топлива — водорода. Рассматриваемые районы отличаются не только благоприятными ветровыми условиями, но и наличием транспортных связей (автомобильных дорог, незамерзающих морских портов), необходимых для доставки оборудования и вывоза водородного топлива. На Кольском полуострове можно предложить несколько площадок, пригодных для производства водорода. Такие площадки имеются западнее Мурманска, на полуострове Рыбачьем (рис. 25), и восточнее Мурманска, в районе Серебрянских и Териберских гидроэлектростанций, где имеются электрические сети. Первые имеют доступ со стороны моря и со стороны автомагистрали Мурманск — Киркенес (Норвегия), вторые располагаются недалеко от крупнейшей в Арктике Кольской ВЭС, которая связана благоустроенной автомобильной дорогой с Мурманском. Производимый водород может использоваться внутри Мурманской области, поставляться в сжиженном виде в другие российские регионы, а также экспортироваться за рубеж.

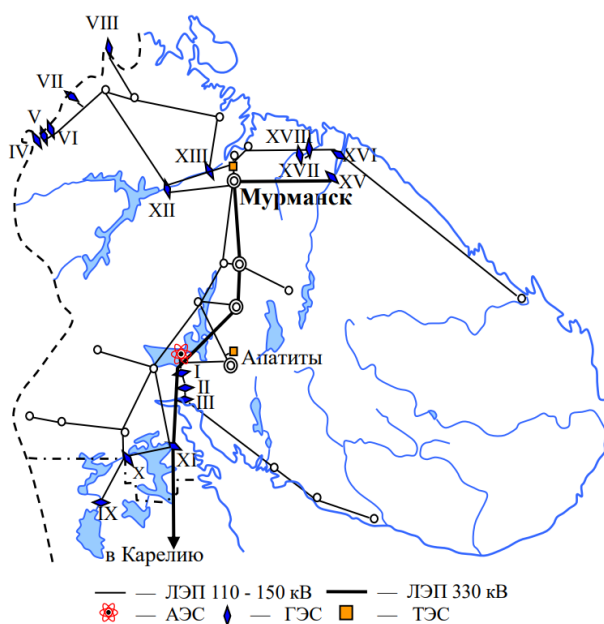


Рис. 25. Схема электрических сетей Кольской энергосистемы
Fig. 25. The diagram of electrical grids of the Kola energy system

Основные результаты выполненных исследований

Регулярные ветроэнергетические исследования в ЦФТПЭС КНЦ РАН стали проводиться начиная с 70-х гг. прошлого века. В первую очередь, они были направлены на изучение энергетических характеристик ветра (среднегодовые скорости, годовой и суточный ход ветра, повторяемость скоростей и направлений ветра, максимальные скорости ветра, удельная мощность

и удельная энергия ветра, ветроэнергетические ресурсы района). Основным источником исходных данных для расчета энергетических характеристик ветра являются наблюдения за ним на опорной сети гидрометеослужбы.

Информация о среднегодовых скоростях ветра служит исходной характеристикой общего уровня его интенсивности. Для сопоставления среднегодовых скоростей в различных пунктах они приводились к сравнимым условиям, за которые были приняты открытая ровная местность и высота 10 м от поверхности земли. На рис. 26 представлены результаты обработки 20-летних рядов наблюдений за скоростью ветра по 37 метеорологическим станциям Кольского полуострова, полученные с учетом приведения их к сравнимым условиям. Видно, что наибольшие среднегодовые скорости ветра наблюдаются в прибрежных районах Баренцева моря. На северном побережье Кольского полуострова они достигают 7–9 м/с, на побережье Белого моря и в горах Хибинах составляют 4–6 м/с, а в материковой части региона снижаются до 2–4 м/с. При увеличении высоты над поверхностью земли средние многолетние скорости ветра существенно возрастают. На высоте 30 м они увеличиваются на 1 м/с, на высоте 70 м — на 2 м/с.

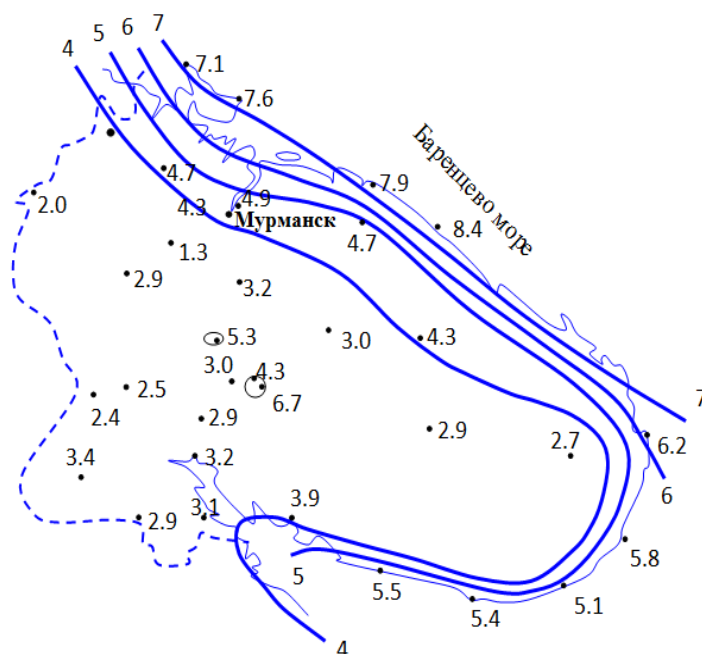


Рис. 26. Средние многолетние скорости ветра (м/с) на высоте 10 м от поверхности земли в условиях открытой ровной местности

Fig. 26. Average multi-year wind speeds (m/s) at a height of 10 m above the ground in open flat terrain

Из рисунка 27, где представлен годовой ход среднемесячных скоростей ветра, следует, что повсеместно сезонное изменение ветра благоприятно для его эффективного использования. Максимум скоростей приходится на холодное время года и совпадает с сезонным пиком потребления энергии. Существенно, что зимний максимум находится в противофазе с годовым стоком рек. То есть ветровая и гидроэнергия удачно дополняют друг друга.

Повторяемость скоростей ветра показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода дули ветры с той или иной скоростью. На рис. 28 показаны аналитические кривые повторяемости скоростей ветра при различных значениях среднегодовой скорости (от 4 до 12 м/с). Видно, что в более ветреных районах спектр наблюдаемых скоростей шире и доля высоких скоростей выше. Площадь под каждой из приведенных кривых одинакова, равна 100 % (или 8760 часов годового времени).

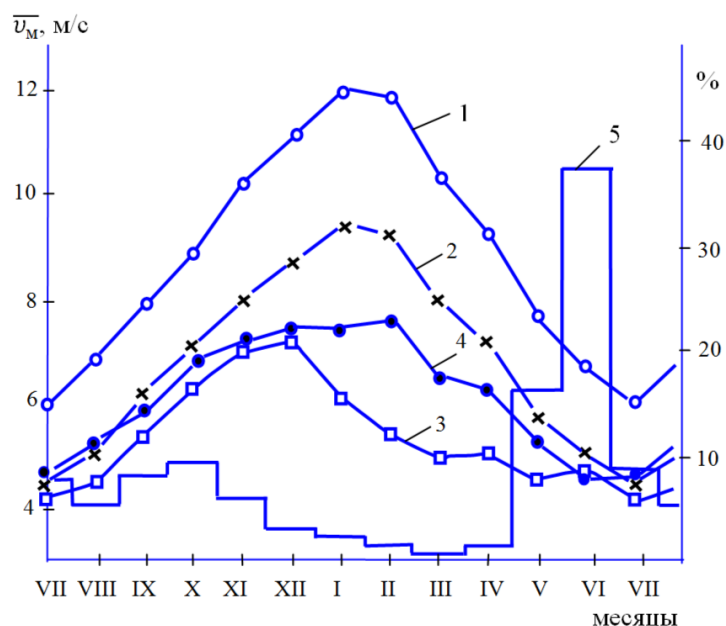


Рис. 27. Годовой ход среднемесячных скоростей ветра на островах (1), побережье (2) Баренцева моря, на побережье Белого моря (3), в Хибинах (4) и гидрограф рек (5):

1 — метеостанция о. Харлов; 2 — Дальние Зеленцы; 3 — Чаванга; 4 — Центральная

Fig. 27. The annual course of average monthly wind speeds on the islands (1) and coast (2) of the Barents Sea, on the coast of the White Sea (3), in the Khibiny Mountains (4), and a river hydrograph (5):

1 — the weather station of Kharlov Island; 2 — Dalniye Zelentsy; 3 — Chavanga; 4 — Tsentralnaja

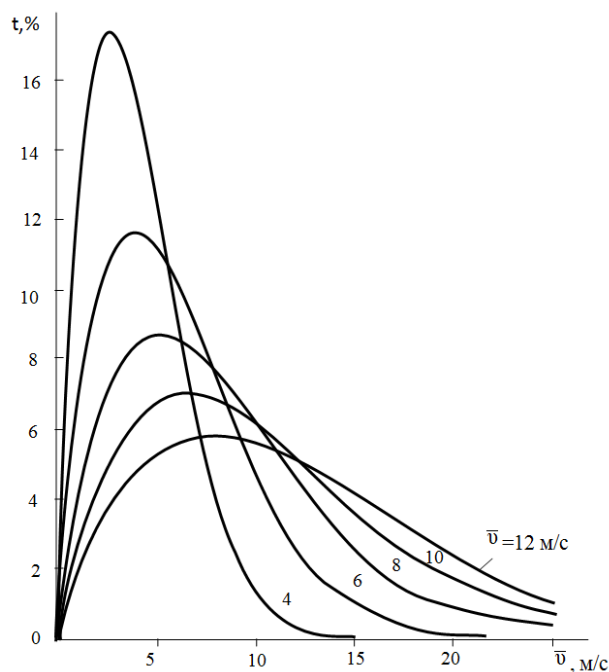


Рис. 28. Кривые повторяемости скоростей ветра при различных среднегодовых скоростях

Fig. 28. Wind speed frequency curves at different average annual speeds

Повторяемость направлений ветра показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода (месяца, года) дули ветры того или иного направления. Правильный учет направлений ветра играет важную роль в определении оптимального расположения ветроустановок на местности. Имеющиеся в справочниках по климату многолетние данные о ветре показывают, что на Кольском полуострове есть районы с преобладающими направлениями ветра, например северное побережье полуострова, где около 50–60 % годового времени дуют юго-западные ветры.

Известно, что мощность ветрового потока пропорциональна плотности воздуха, площади поперечного сечения потока и скорости ветра в третьей степени. Среднегодовая удельная энергия ветра (энергия, протекающая за год через 1 м² поперечного сечения) является интегральной характеристикой. Она зависит от повторяемости скоростей ветра, то есть от того, какую долю годового времени дул ветер с той или иной скоростью (рис. 29).

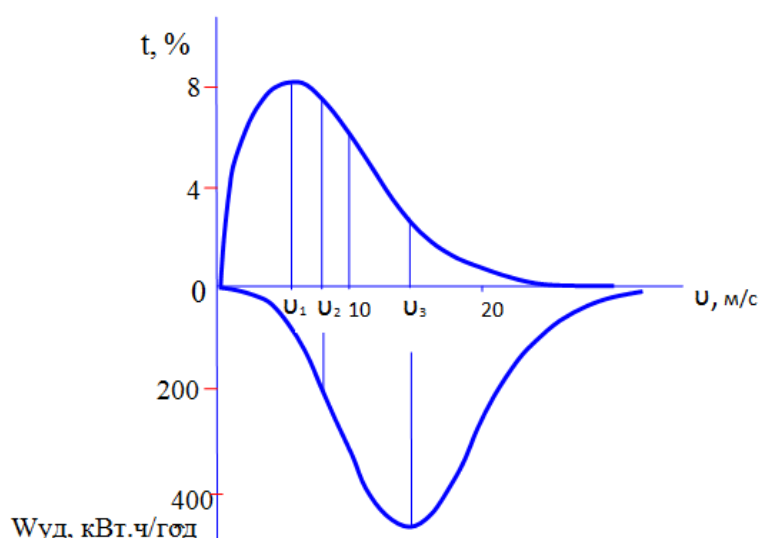


Рис. 29. Повторяемость скоростей ветра t и годовая удельная энергия $W_{уд}$ на побережье Баренцева моря: u_1 — наиболее часто наблюдаемая скорость; u_2 — средняя скорость ветра; u_3 — скорость, обеспечивающая наибольший вклад в годовую выработку энергии

Fig. 29. The wind speed frequency t and annual specific energy W_s on the coast of the Barents Sea: u_1 — the most commonly observed speed; u_2 — the average wind speed; u_3 — the speed providing the greatest contribution to annual energy output

На рисунке 29 в качестве примера показано, как формируется годовая сумма удельной энергии ветра в условиях побережья Баренцева моря. Расчеты выполнены для среднегодовой скорости ветра 8 м/с. Из-за кубической зависимости мощности от скорости ветра наибольший вклад дают не наиболее часто наблюдаемые и даже не средние скорости ветра, а скорости, превышающие последние в 1,7–1,9 раза.

Располагая представленными выше данными о среднегодовых скоростях ветра, его вертикальном профиле, а также о повторяемости его скоростей, можно дать энергетическую характеристику ветра в любом пункте на любой высоте.

Существуют понятия потенциальных, технических и экономических ресурсов ветра. Под потенциальными ресурсами понимается суммарная энергия движения воздушных масс, перемещающихся за год над данной территорией. Технические ресурсы — это часть потенциальных ресурсов, которая может быть использована с помощью имеющихся технических средств. Максимум полезно используемой энергии оценивается коэффициентом использования энергии ветра, который в настоящее время у лучших образцов отечественных и зарубежных ВЭУ составляет 45–48 %.

Расчеты технических ресурсов ветра Кольского полуострова выполнялись по зонам, разбивка на которые производилась в соответствии с уровнем средних многолетних скоростей ветра (см. рис. 26). Расчетная скорость ветра, при которой ВЭУ развивает номинальную мощность, повсеместно выбиралась, исходя из обеспечения 3000 часов использования в году установленной мощности ВЭУ. Оказалось, что, если в указанных зонах со среднегодовыми скоростями ветра 4–8 м/с построить сплошной «лес» ветроустановок, расположенных на расстоянии 10 диаметров ветроколеса друг от друга, практически исключая взаимное влияние, то суммарная установленная мощность ВЭУ достигнет 120 млн кВт. При этом годовая выработка электроэнергии (технические ветроэнергоресурсы) составит около 360 млрд кВт·ч. Наиболее привлекательные с энергетической точки зрения ресурсы расположены вдоль побережья Баренцева моря. Здесь при суммарной мощности ВЭУ около 50 млн кВт технические ресурсы ветра составляют 150 млрд кВт·ч. Использование даже 1–2 % этих ресурсов, самых доступных и экономически наиболее выгодных, может иметь большое значение.

Представленная оценка свидетельствует об огромных ресурсах ветровой энергии на Кольском полуострове, они на порядок превосходят потребности в электроэнергии региона на сегодняшний день. Постановка задачи об использовании доступной части этих ресурсов и вовлечении их в хозяйственный оборот, безусловно, заслуживает внимания.

В числе наиболее очевидных направлений использования энергии ветра можно назвать:

- 1) внедрение крупных ветропарков в состав действующих электроэнергетических систем;
- 2) использование ВЭУ для тепло- и электроснабжения удаленных децентрализованных потребителей;
- 3) использование энергии ветра для производства «зеленого» водорода — экологически чистого вида топлива.

Перспективы реализации этих направлений в Мурманской области сводятся к следующему.

Внедрение ветропарков в энергосистему. В Мурманской области период наибольшей потребности в электрической энергии приходится на холодное и темное время года. Именно в этот период отмечается и максимум скоростей ветра. Данное обстоятельство является важным фактором, благоприятствующим внедрению ветропарков в энергосистему. В Кольской энергосистеме в настоящее время находятся в эксплуатации 17 гидроэлектростанций, которые, располагая суммарной мощностью около 1600 МВт, имеют водохранилища многолетнего, сезонного и суточного регулирования. Это может позволить при достаточно высоких скоростях ветра и активной работе ветропарка снижать нагрузку на ГЭС, запасать в водохранилищах воду. В последующем эта вода может быть использована в периоды слабого ветра или безветрия.

Примерно в 100 километрах восточнее Мурманска располагаются Серебрянские и Териберские ГЭС суммарной мощностью около 500 МВт, которые могут сыграть положительную роль в развитии системной ветроэнергетики. К этому району имеется транспортная доступность по автомобильной дороге, здесь может быть построено несколько ветропарков, и для этого имеются подходящие площадки. Наличие ЛЭП позволяет осуществить передачу энергии в центральные районы области.

Район расположения Серебрянских и Териберских ГЭС вполне может рассматриваться в качестве первоочередного для развития системной ветроэнергетики. Не случайно в этом районе была построена крупнейшая в Арктике Кольская ветроэлектрическая станция мощностью 201 МВт. В ее составе 57 ВЭУ мощностью около 3,5 МВт каждая. Годовая выработка электроэнергии ветропарка в 2023 г. составила около 500 млн кВт·ч, в последующие годы ожидается до 750 млн кВт·ч в год.

Использование ВЭУ в автономной энергетике. В Западном секторе Арктики имеется большое количество небольших автономных потребителей. Только в Мурманской области их насчитывается несколько десятков. К их числу относятся метеостанции (рис. 30, а), маяки гидрографической службы (рис. 30, б), а также пограничные заставы, рыболовецкие и оленеводческие хозяйства (рис. 30, в). Электроснабжение перечисленных потребителей осуществляется от небольших

дизельных электростанций, в которых установлено 2–3 дизель-генератора по 15–20 кВт. Тепловая энергия вырабатывается котельными агрегатами мощностью 20–50 кВт. Суммарная электрическая и тепловая нагрузка каждого потребителя этого класса варьируется в пределах 50–150 кВт.

Объекты Северного флота, также расположенные в прибрежных районах, обеспечиваются энергией от дизельных электростанций и котельных установок. Их суммарная мощность может достигать 200 кВт. Электроснабжение рыболовецких колхозов и оленеводческих хозяйств, базирующихся в прибрежных поселках (рис. 30, в), осуществляется от местных дизельных электростанций мощностью 200–500 кВт, а теплоснабжение — от котельных установок производительностью до 2–3 МВт.

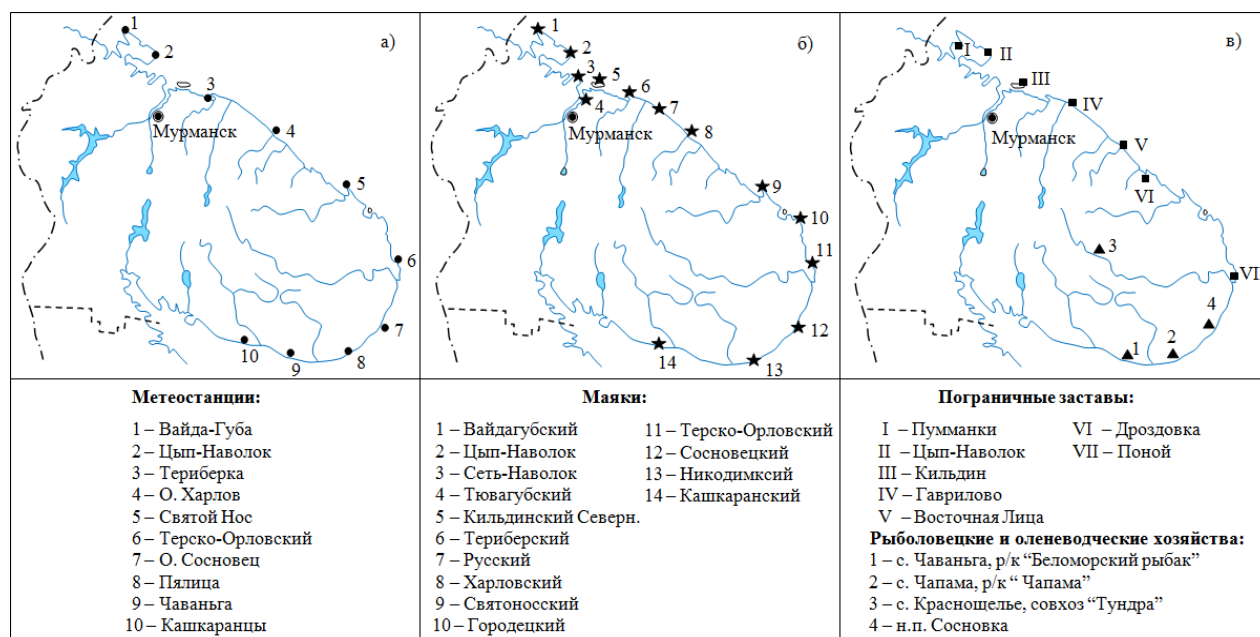


Рис. 30. Расположение автономных потребителей энергии на побережье Кольского полуострова
Fig. 30. The arrangement of autonomous energy consumers on the Kola Peninsula coast

Доставка топлива в удаленные прибрежные районы Кольского полуострова возможна разными видами транспорта. Но использование автомобильного транспорта затруднено из-за продолжительного зимнего периода, сильных снежных заносов и короткого светового дня (полярной ночи). Поэтому широко используется водный морской, бездорожный и воздушный транспорт. Расходы на местный распределительный транспорт варьируются в широких пределах и способствуют существенному удорожанию топлива. Цена на топливо может возрасти при использовании танкеров в 1,3–1,8 раза, бездорожного транспорта — в 1,5–2,5 раза, а при использовании авиации — в 3 раза по отношению к отпускной цене.

Это означает, что после доставки потребителю топливо может подорожать до 70–100 тыс. руб/т, что способствует росту затрат на выработку энергии. Это подталкивает потребителя к экономному, бережному расходованию топлива, изысканию путей его возможного замещения (вытеснения) другими видами энергии, в частности таким местным источником энергии, как ветер.

Опыт показывает, что дизельные электростанции обычно укомплектованы тремя-четырьмя дизельными агрегатами, что позволяет маневрировать мощностями, вовремя проводить их техническое обслуживание, иметь необходимый аварийный резерв. Число часов использования установленной мощности ДЭС составляет 2000–2500. Все ДЭС находятся в зоне, где среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м составляют 6–8 м/с.

Прибрежные районы Кольского полуострова располагают повышенным потенциалом ветра (см. рис. 26). При внедрении ВЭУ можно покрыть часть графика нагрузки ДЭС. Расчеты показали, что при указанном потенциале ветра число часов использования установленной мощности ВЭУ может составить более 3000. Доля ВЭУ в выработке энергии комплексом ДЭС + ВЭУ может достигать 18–30 %, а срок окупаемости капиталовложений в ВЭУ всего 1,3–2,2 года. Это представляется очень благоприятным.

Объем вытесненного топлива при указанных ветровых условиях также оказывается достаточно высоким и достигает на побережье Белого моря 13–20 % годового расхода, а на побережье и островах Баренцева моря — 20–30 %.

Повышенные скорости ветра в прибрежных районах Мурманской области открывают большие возможности использования ВЭУ для теплоснабжения потребителей. В качестве предпосылок для развития этого направления следует отметить значительную продолжительность отопительного периода, а также совпадение максимумов потребности в тепловой энергии и возможной выработки ВЭУ, приходящихся на зимнее время. В этих условиях ветер из фактора, определяющего повышенные тепловые потери, может стать полноценным источником энергии.

Основным недостатком ветра является его непостоянство. Но эта негативная сторона может быть сглажена. Кратковременные изменения мощности ветра могут выравниваться за счет инерционности самой системы теплоснабжения. Кроме того, благодаря аккумулирующей способности отапливаемых зданий минутные и даже часовые колебания могут компенсироваться. Перспективным также представляется применение аккумуляторов тепла для их зарядки в периоды избытка ветра и использования запасенной энергии при длительных периодах его ослабления.

Обработка обширных материалов наблюдений на метеостанциях Мурманской области позволила оценить возможное участие ВЭУ в теплоснабжении, причем сделать это как в разрезе отдельных месяцев, так и в целом за год. Оказалось, что если мощность ВЭУ намного меньше мощности котельной, то выработка ВЭУ почти полностью вписывается в график нагрузки. Наращивание мощности ВЭУ приводит к увеличению доли участия ВЭУ. Но одновременно возрастает вероятность неполного использования ветровой энергии и возникновения излишков. Это может наблюдаться, когда мощность ВЭУ превышает 60 % мощности котельной. Для наиболее эффективного внедрения ВЭУ были проведены расчеты по оптимизации их мощности. Они показали, что оптимальным является соотношение мощностей ВЭУ и котельной в диапазоне 0,6–0,8. При этих значениях доля ВЭУ в покрытии графика нагрузки достигает 40–70 % (в зависимости от потенциала ветра).

Использование энергии ветра для производства водорода. Этому направлению в последнее время уделяется большое внимание во всем мире. Производство водорода в арктических районах, располагающих высоким потенциалом ветра, транспортными связями (автомобильными дорогами, незамерзающими морскими портами), может быть эффективным и экономически оправданным. В последние годы интерес возрастает и в связи с резким подорожанием традиционного органического топлива (нефтепродуктов, природного и сжиженного газа, угля). Производимый в Арктике водород может использоваться внутри северных территорий, поставляться в сжиженном виде в другие близлежащие районы страны, а также экспортироваться за рубеж.

Водородная тема на сегодняшний день активно изучается, и вполне вероятно, что произведенный с использованием возобновляемых источников энергии водород в будущем сможет занять важное место в энергетике.

Исследования показали, что благоприятные условия для развития водородной энергетики имеются и в Арктической зоне РФ, в том числе на Кольском полуострове. Здесь можно предложить несколько площадок с высоким потенциалом ветра (рис. 31), пригодных для сооружения ВЭУ и развертывания производства водорода. В качестве первоочередных можно предложить две площадки на полуострове Рыбачий (в 100–120 км северо-западнее Мурманска) и две площадки в районе с. Териберка (в 125 км восточнее Мурманска). Для этих площадок характерна повышенная интенсивность ветра.



Рис. 31. Площадки 1–4 для размещения производства водорода с использованием ветровой энергии
Fig. 31. The 1–4 sites for accommodation the hydrogen production using wind energy

Первая площадка располагается на западной оконечности полуострова Рыбачий, рядом с метеостанцией «Вайда-Губа». Местность в этом районе не слишком пересеченная, высота над уровнем моря в основном около 60–80 м. Доступ к площадке имеется со стороны моря, а также по грунтовой дороге длиной около 70 км, связывающей площадку с автомагистралью Мурманск — Киркенес (Норвегия).

Вторая площадка расположена в центральной части полуострова Рыбачий. Она тяготеет к Мотовскому заливу Баренцева моря. Площадка имеет высотные отметки около 100–130 м над уровнем моря и пригодна для размещения парка ветроэнергетических установок. Заслуживает внимания Мотовский залив, хорошо защищенный от морского волнения. Он имеет причальные сооружения и может быть использован как для поставки грузов при сооружении ВЭУ, так и в последующем для вывоза готовой продукции (водорода).

Третья площадка расположена в 80 км восточнее Мурманска, рядом с Кольской ветроэлектрической станцией мощностью 201 МВт. Четвертая площадка — между поселком Туманный и Нижне-Серебрянской ГЭС. Обе площадки располагаются на высотах около 180–220 м над уровнем моря, находятся вблизи благоустроенной автомобильной дороги, соединяющей поселки с областным центром.

Список источников

1. Минин В. А., Лазарева М. А. Кольская энергосистема: этапы становления, современное состояние и перспективы развития // Электрические станции. 2023. № 11. С. 22–28. doi:10.34831/EP.2023.1108.11.003.
2. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 1. Реки Восточная Лица и Харловка / В. В. Богданов, И. Т. Изотова, К. Н. Балашов, А. П. Панин. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 170 с.
3. Богданов В. В., Балашов К. Н., Панин А. П. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 2. Река Поной. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 92 с.
4. Панин А. П. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 3. Гидроэнергетические ресурсы Кольского полуострова и основные принципы их использования. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 147 с.
5. Богданов В. В., Балашов К. Н., Панин А. П. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 4. Реки Варзина и Дроздовка. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 83 с.
6. Куклин Е. И. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 5. Река Умба. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 102 с.
7. Марков П. И. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 6. Энергетическая характеристика рек Кольского полуострова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 162 с.
8. Изотова И. Т., Балашов К. Н., Панин А. П. Водноэнергетические ресурсы Кольского полуострова. Выпуск 7. Реки Варзуга и Стрельна. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 120 с.
9. К вопросу об использовании энергии ветра на Кольском полуострове / Е. И. Куклин, В. П. Елистратов, Н. С. Малиновский, В. А. Минин // Вопросы экономической и технической географии Севера европейской части СССР. Апатиты, 1972. С. 41–43.
10. О некоторых энергетических характеристиках режима ветра прибрежной зоны Кольского полуострова / Е. И. Куклин, В. П. Елистратов, Н. С. Малиновский, В. А. Минин // Природа и хозяйство Севера. Вып. 5. Л., 1976. С. 81–89.
11. Некоторые результаты исследования энергетических характеристик ветра Кольского полуострова / Е. И. Куклин, В. П. Елистратов, Н. С. Малиновский, В. А. Минин // Вопросы энергетики Кольского полуострова. Апатиты: Изд-во КФАН СССР, 1975. С. 153–164.
12. Куклин Е. И., Елистратов В. П., Минин В. А. Энергоснабжение мелких изолированных потребителей Мурманской области // Развитие энергетического хозяйства Мурманской области. Апатиты: Изд-во КФАН СССР, 1976. С. 49–57.
13. Куклин Е. И., Минин В. А. Некоторые результаты экспериментального исследования работы ветроэлектрического агрегата «Беркут» в условиях Севера // Развитие энергоснабжения Севера Европейской части СССР. Апатиты: Изд-во КФАН СССР, 1978. С. 130–136.
14. Куклин Е. И., Минин В. А. О режимах работы ветроэнергетических установок на побережье Кольского полуострова // Развитие энергетического хозяйства Мурманской области. Апатиты: Изд-во КФАН СССР, 1976. С. 80–86.
15. Минин В. А. Основные элементы ветроэнергетического кадастра Севера Европейской части СССР // Проблемы энергетики Мурманской области и соседних районов. Апатиты: Изд-во КФАН СССР, 1980. С. 135–151.
16. Минин В. А., Степанов И. Р. Ветроэнергетический кадастр Европейского Севера СССР // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1983. № 1. С. 106–114.
17. Минин В. А. Ветроэнергетические ресурсы Европейского Севера СССР // Экономия топлива и энергии в народном хозяйстве Мурманской области. Апатиты: Изд-во КФАН СССР, 1983. С. 79–88.
18. Зубарев В. В., Минин В. А., Степанов И. Р. Использование энергии ветра в районах Севера: состояние, условия эффективности, перспективы. Л.: Наука, 1989. 208 с.
19. Minin V., Dobrovolski V. Kola test station for wind turbines // An international Experts Meeting on Wind Power in Icing Conditions. Helsinki FMI. 1992. P. 188–192.
20. Kniazeva V., Marchuk S. Nord region wind power and its impact // An international Experts Meeting on Wind Power in Icing Conditions. Helsinki FMI. 1992. P. 135–143.

21. Minin V. Windenergiepotential der Halbinsel Kola, Voraussetzungen und mögliche Richtungen dessen Ansnutzung // 2.Deutsche Windenergie-Konferenz 1994, DEWEK-94. Wilhelmshaven, BRD. 1994. S. 483–486.
22. The Wind energy development in Russia / P. Bezrukikh [et al.] // Proceedings of an International Meeting BOREAS II. Pyhatunturi, Finland 21–25.03.1994. P. 40–48.
23. Minin V., Dmitriev G. The Kola peninsula Wind energy potential and possible directions of it's using // Proceedings of an International Meeting BOREAS II. Pyhatunturi, Finland 21–25.03.1994. P. 115–125.
24. Minin V. Substantiation of Wind energy converter optimal power in combined electrical and heating supply systems // Proceedings of an International Meeting BOREAS II. Pyhatunturi, Finland 21–25.03.1994. P. 290–300.
25. Minin V. Kola wind test station on the Barents seashore // 14th Annual International Meeting of Wind Turbine Test station. Boulder, Colorado, USA. 1994. P. 177–185.
26. Dmitriev G., Minin V. The Kola peninsula Wind-Energy potential and possible Directions of it's using // 14th Annual International Meeting of Wind Turbine Test station. Boulder, Colorado, USA. 1994. P. 185–192.
27. Wind Energy on the Kola Peninsula — Findings from a Field study / E. Peltola [et al.] // Wind Energy Production in Cold Climates. BOREAS III. Proceedings of an International Meeting. 19–21 March 1996. Saariselka, Finland. P. 60–72.
28. Minin V., Dmitriev G. Possible Role of Wind-Power in Energy Supply for European North of Russia // Wind Energy Production in Cold Climates. BOREAS III. Proceedings of an International Meeting. 19–21 March 1996. Saariselka, Finland. P. 147–160.
29. A Feasibility Study to Develop Local and Regional Use of Wind Energy on the Kola Peninsula, Murmansk Region, Russia: Final Report / E. Peltola [et al.]. Contract JOR3-CT95-0036. Non-Nuclear Energy Programme JOULE III. 1998. 61 p.
30. Information Exchange and Competence Building regarding the Use of Wind Energy on the Kola Peninsula, in North-Western Russia (KW Support): Final Report / E. Peltola [et al.]. Contract INCOP-DISS-2004-96. Programme INCO-COPERNICUS. 1998. 82 p.
31. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Перспективы развития ветроэнергетики на Кольском полуострове. Апатиты: Изд-во КНИЦ РАН, 1998. 97 с.
32. A feasibility study of Wind energy on the Kola Peninsula / J. Wolff [et al.] // European Wind Energy Conference. EWEC-97. 6–9 October 1997. Dublin Castle, Ireland. 1998. P. 354–358.
33. Rathmann O., Landberg L. Wind atlas for the Kola Peninsula / European Wind Energy Conference. EWEC-97. 6–9 October 1997. Dublin Castle, Ireland. 1998. P. 359–362.
34. Dmitriev G., Minin V. Some Aspects of Large Scale Wind Energy Integration into Combined (Nuclear — Hydro — Thermal) Power System / Wind Energy for Next Millennium. European Wind Energy Conference. Nice, France, 1–5 March 1999. P. 383–386.
35. Possibilities for Wind Energy on the Kola Peninsula / J. Wolff [et al.] // Wind Energy for Next Millennium. European Wind Energy Conference. Nice, France, 1–5 March 1999. P. 512–515.
36. Dmitriev G., Minin V. Large Scale wind energy integration — the possibility of another way energy development // Sixth International Symposium on Cold Region Development, ISCORD-2000. 31 January — 6 February 2000. Hobart, Tasmania, Australia. P. 21–24.
37. Minin V., Dmitriev G., Minin I. Economical evaluation of wind power implementation at Kola Peninsula // Proceedings of BOREAS V, Wind Power Production in Cold Climate, International Conference, Levi, Finland, 29.11.–01.12. 2000. P. 1–11.
38. Атлас ветров России / А. Н. Старков [и др.]. М.: «Можайск-Терра», 2000. 560 с.
39. Dmitriev G. Possible approaches in defining of wind parks impact on the regime of power system // Abstracts of the 4th World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition. Melbourne, Australia, 2–4 November 2005. P. 20.
40. Dmitriev G., Minin V., Dmitrieva N. Wind Power development under Polar climate conditions // Abstracts of the 4th World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition. Melbourne, Australia, 2–4 November 2005. P. 31.

41. The problems of windparks lightning protection for the regions with high specific resistance of soil / B. Efimov [et al.] // Abstracts of the 4th World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition. Melbourne, Australia, 2–4 November 2005. P. 41–42.
42. Безруких П. П., Виссарионов В. И., Минин В. А. Концепция использования ветровой энергии в России. М.: «Книга-Пента», 2005. 128 с.
43. Минин В. А., Дмитриев Г. С., Минин И. В. Перспективы освоения ресурсов ветровой энергии Кольского полуострова // Известия РАН. Энергетика. 2001. № 1. С. 45–53.
44. Оценка инвестиционной привлекательности сооружения ветровых парков на Кольском полуострове / В. А. Минин [и др.] // Бизнес и инвестиции в области возобновляемых источников энергии в России: Труды Международного Конгресса. Москва, 31 мая — 4 июня 1999 г. Ч. III. М.: НИЦ «Инженер», 1999. С. 325–326.
45. Условия применения ветроэлектрических станций в составе Кольской энергосистемы / В. А. Минин [и др.]. Апатиты, 2002. 36 с. Деп. в ВИНТИ 10.07.2002, № 1283 – В2002.
46. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Опыт первого года эксплуатации сетевой ветроэнергетической установки вблизи Мурманска. 18 с. Деп. в ВИНТИ 07.07.2003, № 1300 – В 2003.
47. Minin V., Dmitriev G. First Experience from one Year Operation of Grid Connected Wind Turbine // Proceedings of BOREAS VI. Wind Power Production in Cold Climate. International Conference. Pyhatunturi, Finland, 9–11 April 2003. P. 26–30.
48. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Опыт монтажа и эксплуатации сетевой ветроэнергетической установки около г. Мурманска // Электрические станции. 2004. № 2. С. 71–73.
49. Минин В. А., Дмитриев Г. С., Иванова Е. А. Первоочередные площадки для ветропарков на Кольском полуострове. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. 24 с.
50. Абросимова А. А. Ветропарк в районе 81 км автодороги Мурманск — Териберка // Научно-технические проблемы развития энергетики Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. С. 30–34.
51. Минин В. А., Дмитриев Г. С., Иванова Е. А. Энергия ветра — перспективный возобновляемый энергоресурс Мурманской области: Препринт. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. 73 с.
52. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Ветроэнергетика в условиях Заполярья // Энергия: экономика, техника, экология. 2006. № 7. С. 20–25.
53. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск, 2007. 92 с.
54. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Перспективы использования энергии ветра и малых ГЭС в удаленных районах Мурманской области. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. 97 с.
55. Перспективы использования энергии ветра и стока р. Вудъяврйок для электроснабжения Полярно-альпийского ботанического сада-института: Препринт / В. А. Минин [и др.]. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. 32 с.
56. Бежан А. В. Ветроэнергетика Мурманской области // Электрические станции. 2017. № 7. С. 51–55.
57. Минин В. А. Региональная программа использования возобновляемых источников энергии в Мурманской области на период 2010–2015 годы // Энергетическая политика. 2009. № 5. С. 39–45.
58. Минин В. А. Региональная программа использования возобновляемых источников энергии в Мурманской области // Сборник материалов Международного конгресса «Дни чистой энергии в Петербурге», Санкт-Петербург, 15–16 апреля 2010 г. СПб., 2010. С. 32–35.
59. Минин В. А., Бежан А. В. Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения автономных потребителей Севера // Сборник материалов Международного конгресса «Дни чистой энергии в Петербурге», Санкт-Петербург, 15–16 апреля 2010 г. СПб., 2010. С. 61–65.
60. Минин В. А. Ресурсы нетрадиционных и возобновляемых источников энергии Мурманской области и приоритеты их использования // Вестник КНЦ РАН. 2010. № 1. С. 94–101.
61. Минин В. А. Региональная программа использования возобновляемых источников энергии в Мурманской области // Использование возобновляемых энергоносителей в странах мира. Информационный сборник. Выпуск 1. СПб.: ООО «Адвент РФ», 2010. С. 29–32.

62. Минин В. А. Перспективы применения ветроэнергетических установок для теплоснабжения потребителей Севера // Теплоэнергетика. 2003. № 1. С. 48–53.
63. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей Севера // Техничко-экономические и электрофизические проблемы развития энергетики Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. С. 40–49.
64. Минин В. А., Бежан А. В. Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей европейского Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. 56 с.
65. Минин В. А. Оценка перспектив использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей Севера // Теплоэнергетика. 2009. № 11. С. 34–40.
66. Минин В. А. Перспективы включения возобновляемых источников энергии в топливно-энергетический баланс Мурманской области // Малая энергетика. 2011. № 1–2. С. 99–103.
67. Баранник Б. Г., Коновалова О. Е., Минин В. А. Перспективы совершенствования энергетического хозяйства в районах Севера за счет использования возобновляемых источников энергии. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2011. 154 с.

References

1. Minin V. A., Lazareva M. A. Kol'skaya energosistema: etapy stanovleniya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Kola power system: stages of formation, current state and development prospects]. *Elektricheskie stantsii* [Electrical Stations], 2023, No 11, pp. 22–28. (In Russ.). doi:10.34831/EP.2023.1108.11.003.
2. Bogdanov V. V., Izotova I. T., Balashov K. N., Panin A. P. *Vodnoenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 1. Reki Vostochnaya Litsa i Kharlovka* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 1. The Vostochnaya Litsa and Kharlovka Rivers]. Moscow, Leningrad, Publ. AS USSR, 1958, 170 p. (In Russ.).
3. Bogdanov V. V., Balashov K. N., Panin A. P. *Vodnoenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 2. Reka Ponoy* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 2. The Ponoy River]. Moscow, Leningrad, Publ. AS USSR, 1958, 92 p. (In Russ.).
4. Panin A. P. *Vodnoenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 3. Hidroenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova i osnovnye printsipy ikh ispol'zovaniya* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 3. Hydropower resources of the Kola Peninsula and the basic principles of their use]. Moscow, Leningrad, Publ. AS USSR, 1960, 147 p. (In Russ.).
5. Bogdanov V. V., Balashov K. N., Panin A. P. *Vodnoenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 4. Reki Varzina i Drozdovka* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 4. The Varzina and Drozdovka Rivers]. Moscow, Leningrad, Publ. AS USSR, 1960, 83 p. (In Russ.).
6. Kuklin E. I. *Vodnoenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 5. Reka Umba* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 5. The Umba River]. Moscow, Leningrad, Publ. AS USSR, 1961, 102 p. (In Russ.).
7. Markov P. I. *Vodnoenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 6. Energeticheskaya kharakteristika rek Kol'skogo poluostrova* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 6. Energy characteristics of the rivers of the Kola Peninsula]. Moscow, Leningrad, Publ. AS USSR, 1961, 162 p. (In Russ.).
8. Izotova I. T., Balashov K. N., Panin A. P. *Vodnoenergeticheskie resursy Kol'skogo poluostrova. Vypusk 7. Reki Varzuga i Strel'na* [Water and energy resources of the Kola Peninsula. Issue 7. The Varzuga and Strel'na Rivers]. Moscow, Leningrad, Publ. AS USSR, 1961, 120 p. (In Russ.).
9. Kuklin E. I., Elistratov V. P., Malinovskiy N. S., Minin V. A. K voprosu ob ispol'zovanii energii vetra na Kol'skom poluostrove [On the issue of the use of wind energy on the Kola Peninsula]. *Voprosy ekonomicheskoy i tekhnicheskoy geografii Severa evropeyskoy chasti SSSR* [Issues of economic and technical geography of the North of the European part of the USSR]. Apatity, 1972, pp. 41–43. (In Russ.).
10. Kuklin E. I., Elistratov V. P., Malinovskiy N. S., Minin V. A. O nekotorykh energeticheskikh kharakteristikakh rezhima vetra pribrezhnoy zony Kol'skogo poluostrova [On some energy characteristics of the wind regime in the coastal zone of the Kola Peninsula]. *Priroda i khozyaystvo Severa. Vypusk 5* [Nature and economy of the North. Issue 5]. Leningrad, 1976, pp. 81–89. (In Russ.).

11. Kuklin E. I., Elistratov V. P., Malinovskiy N. S., Minin V. A. Nekotorye rezul'taty issledovaniya energeticheskikh kharakteristik vetra Kol'skogo poluostrova [Some results of the study of the energy characteristics of the wind of the Kola Peninsula]. *Voprosy energetiki Kol'skogo poluostrova* [Energy Issues of the Kola Peninsula]. Apatity, Publ. KBAS USSR, 1975, pp. 153–164. (In Russ.).
12. Kuklin E. I., Elistratov V. P., Minin V. A. Energosnabzhenie melkikh izolirovannykh potrebiteley Murmanskoy oblasti [Energy supply to small isolated consumers in the Murmansk region]. *Razvitie energeticheskogo khozyaystva Murmanskoy oblasti* [Development of the energy sector of the Murmansk region]. Apatity, Publ. KBAS USSR, 1976, pp. 49–57. (In Russ.).
13. Kuklin E. I., Minin V. A. Nekotorye rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniya raboty vetroelektricheskogo agregata “Berkut” v usloviyakh Severa [Some results of an experimental study of the operation of the wind power unit “Berkut” in the conditions of the North]. *Razvitie energosnabzheniya Severa Evropeyskoy chasti SSSR* [Development of energy supply to the North of the European part of the USSR]. Apatity, Publ. KBAS USSR, 1978, pp. 130–136. (In Russ.).
14. Kuklin E. I., Minin V. A. O rezhimakh raboty vetroenergeticheskikh ustanovok na poberezh'e Kol'skogo poluostrova [About the operating modes of wind turbines on the coast of the Kola Peninsula]. *Razvitie energeticheskogo khozyaystva Murmanskoy oblasti* [Development of the energy sector of the Murmansk region]. Apatity, Publ. KBAS USSR, 1976, pp. 80–86. (In Russ.).
15. Minin V. A. Osnovnye elementy vetroenergeticheskogo kadastra Severa Evropeyskoy chasti SSSR [The main elements of the wind energy cadastre of the North of the European part of the USSR]. *Problemy energetiki Murmanskoy oblasti i sosednikh rayonov* [Energy problems of the Murmansk region and neighboring areas]. Apatity, Publ. KBAS USSR, 1980, pp. 135–151. (In Russ.).
16. Minin V. A., Stepanov I. R. Vetroenergeticheskiy kadastr Evropeyskogo Severa SSSR [Wind energy cadastre of the European North of the USSR]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport* [Proceedings of AS USSR. Energy and Transport], 1983, No 1, pp. 106–114. (In Russ.).
17. Minin V. A. Vetroenergeticheskie resursy Evropeyskogo Severa SSSR [Wind energy resources of the European North of the USSR]. *Ekonomiya topliva i energii v narodnom khozyaystve Murmanskoy oblasti* [Saving fuel and energy in the national economy of the Murmansk region]. Apatity, Publ. KBAS USSR, 1983, pp. 79–88. (In Russ.).
18. Zubarev V. V., Minin V. A., Stepanov I. R. *Ispol'zovanie energii vetra v rayonakh Severa* [The use of wind energy in the North]. Leningrad, Nauka, 1989, 208 p. (In Russ.).
19. Minin V., Dobrovolski V. Kola test station for wind turbines. An international Experts Meeting on Wind Power in Icing Conditions. Helsinki FMI, 1992, pp. 188–192.
20. Kniazeva V., Marchuk S. Nord region wind power and its impact. An international Experts Meeting on Wind Power in Icing Conditions. Helsinki FMI, 1992, pp. 135–143.
21. Minin V. Windenergiepotential der Halbinsel Kola, Voraussetzungen und mogliche Richtungen dessen Ansnutzung. 2.Deutsche Windenergie-Konferenz 1994, DEWEK-94. Wilhelmshaven, BRD, 1994, pp. 483–486.
22. Bezrukikh P., Minin V., Dmitriev G., Sidorenko G., Lasareva J. The Wind energy development in Russia. *Proceedings of an International Meeting BOREAS II*. Pyhatunturi, Finland 21–25.03.1994, pp. 40–48.
23. Minin V., Dmitriev G. The Kola peninsula Wind energy potential and possible directions of it's using. *Proceedings of an International Meeting BOREAS II*. Pyhatunturi, Finland 21–25.03.1994, pp. 115–125.
24. Minin V. Substantiation of Wind energy converter optimal power in combined electrical and heating supply systems. *Proceedings of an International Meeting BOREAS II*. Pyhatunturi, Finland 21–25.03.1994, pp. 290–300.
25. Minin V. Kola wind test station on the Barents seashore. *14th Annual International Meeting of Wind Turbine Test station*. Boulder, Colorado, USA, 1994, pp. 177–185.
26. Dmitriev G., Minin V. The Kola peninsula Wind-Energy potential and possible Directions of it's using. *14th Annual International Meeting of Wind Turbine Test station*. Boulder, Colorado, USA, 1994, pp. 185–192.

27. Peltola E., Wolff J., Minin V., Dmitriev G., Rantanen Y. Wind Energy on the Kola Peninsula — Findings from a Field study. *Wind Energy Production in Cold Climates. BOREAS III. Proceedings of an International Meeting*. 19–21 March 1996. Saariselka, Finland, pp. 60–72.
28. Minin V., Dmitriev G. Possible Role of Wind-Power in Energy Supply for European North of Russia. *Wind Energy Production in Cold Climates. BOREAS III. Proceedings of an International Meeting*. 19–21 March 1996. Saariselka, Finland, pp. 147–160.
29. Peltola E., Wolff J., Minin V., Dmitriev G. A Feasibility Study to Develop Local and Regional Use of Wind Energy on the Kola Peninsula, Murmansk Region, Russia: Final Report. Contract JOR3-CT95-0036. Non-Nuclear Energy Programme JOULE III, 1998, 61 p.
30. Peltola E., Wolff J., Minin V., Dmitriev G., Rathmann O. Information Exchange and Competence Building regarding the Use of Wind Energy on the Kola Peninsula, in North-Western Russia (KW Support): Final Report. Contract INCOP-DISS-2004-96. Programme INCO-COPERNICUS. 1998, 82 p.
31. Minin V. A., Dmitriev G. S. *Perspektivy razvitiya vetroenergetiki na Kol'skom poluostrove* [Prospects for the development of wind energy on the Kola Peninsula]. Apatity, Publ. KSC RAS, 1998, 97 p. (In Russ.).
32. Wolff J., Peltola E., Minin V., Dmitriev G., Islander S. A feasibility study of Wind energy on the Kola Peninsula. *European Wind Energy Conference. EWEC-97*. 6–9 October 1997. Dublin Castle, Ireland, 1998, pp. 354–358.
33. Rathmann O., Landberg L. Wind atlas for the Kola Peninsula. *European Wind Energy Conference. EWEC-97*. 6–9 October 1997. Dublin Castle, Ireland, 1998, pp. 359–362.
34. Dmitriev G., Minin V. Some Aspects of Large Scale Wind Energy Integration into Combined (Nuclear — Hydro — Thermal) Power System. *Wind Energy for Next Millennium. European Wind Energy Conference*. Nice, France, 1–5 March 1999, pp. 383–386.
35. Wolff J., Peltola E., Minin V., Dmitriev G., Islander S. Possibilities for Wind Energy on the Kola Peninsula. *Wind Energy for Next Millennium. European Wind Energy Conference*. Nice, France, 1–5 March 1999, pp. 512–515.
36. Dmitriev G., Minin V. Large Scale wind energy integration — the possibility of another way energy development. *Sixth International Symposium on Cold Region Development, ISCORD-2000*. 31 January — 6 February 2000. Hobart, Tasmania, Australia, pp. 21–24.
37. Minin V., Dmitriev G., Minin I. Economical evaluation of wind power implementation at Kola Peninsula. *Proceedings of BOREAS V, Wind Power Production in Cold Climate, International Conference*, Levi, Finland, 29.11.–01.12. 2000, pp. 1–11.
38. Starkov A. N., Landberg L., Bezrukikh P. P., Borisenko M. M. *Atlas vetrov Rossii* [Atlas of the winds of Russia]. Moscow, “Mozhaysk-Terra”, 2000, 560 p. (In Russ.).
39. Dmitriev G. Possible approaches in defining of wind parks impact on the regime of power system. *Abstracts of the 4th World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition*. Melbourne, Australia, 2–4 November 2005, p. 20.
40. Dmitriev G., Minin V., Dmitrieva N. Wind Power development under Polar climate conditions. *Abstracts of the 4th World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition*. Melbourne, Australia, 2–4 November 2005, p. 31.
41. Efimov B., Danilin A., Dmitriev G., Nevretdinov Y. The problems of windparks lightning protection for the regions with high specific resistance of soil. *Abstracts of the 4th World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition*. Melbourne, Australia, 2–4 November 2005, pp. 41–42.
42. Bezrukikh P. P., Vissarionov V. I., Minin V. A. *Kontseptsiya ispol'zovaniya vetrovoy energii v Rossii* [The concept of using wind energy in Russia]. Moscow, “Kniga-Penta”, 2005, 128 p. (In Russ.).
43. Minin V. A., Dmitriev G. S., Minin I. V. *Perspektivy osvoeniya resursov vetrovoy energii Kol'skogo poluostrova* [Prospects for the development of wind energy resources of the Kola Peninsula]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of RAS. Energy], 2001, No 1, pp. 45–53. (In Russ.).

44. Minin V. A., Krivorutskiy L. D., Dmitriev G. S., Minin I. V. Otsenka investitsionnoy privlekatel'nosti sooruzheniya vetrovykh parkov na Kol'skom poluostrove [Assessment of the investment attractiveness of the construction of wind parks on the Kola Peninsula]. *Biznes i investitsii v oblasti vozobnovlyаемых источников энергии в России* [Business and investments in the field of renewable energy sources in Russia]. P. III. Moscow, NITS “Inzhener”, 1999, pp. 325–326. (In Russ.).
45. Minin V. A., Dmitriev G. S., Ivanova E. A., Loginov R. S., Minin I. V., Nikiforova G. V. *Usloviya primeneniya vetroelektricheskikh stantsiy v sostave Kol'skoy energosistemy* [Conditions for the use of wind power plants as part of the Kola power system]. Apatity, 2002, 36 p. Deposited by VINITI 10.07.2002, No 1283 – V2002. (In Russ.).
46. Minin V. A., Dmitriev G. S. *Opyt pervogo goda ekspluatatsii setevoy vetroenergeticheskoy ustanovki vblizi Murmansk* [The experience of the first year of operation of a network wind turbine near Murmansk], 18 p. Deposited by VINITI 07.07.2003, No 1300 – V 2003. (In Russ.).
47. Minin V., Dmitriev G. First Experience from one Year Operation of Grid Connected Wind Turbine. *Proceedings of BOREAS VI. Wind Power Production in Cold Climate. International Conference*. Pyhatunturi, Finland, 9–11 April 2003, pp. 26–30.
48. Minin V. A., Dmitriev G. S. Opyt montazha i ekspluatatsii setevoy vetroenergeticheskoy ustanovki okolo g. Murmansk [Experience in installation and operation of a network wind turbine near Murmansk]. *Elektricheskie stantsii* [Electrical Stations], 2004, No 2, pp. 71–73. (In Russ.).
49. Minin V. A., Dmitriev G. S., Ivanova E. A. *Pervoocherednye ploshchadki dlya vetroparkov na Kol'skom poluostrove* [Priority sites for wind farms on the Kola Peninsula]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2004, 24 p. (In Russ.).
50. Abrosimova A. A. Vetropark v rayone 81 km avtodorogi Murmansk — Teriberka [Wind farm in the area of 81 km of the Murmansk — Teriberka highway]. *Nauchno-tekhnicheskie problemy razvitiya energetiki Severa* [Scientific and technical problems of energy development in the North]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2009, pp. 30–34. (In Russ.).
51. Minin V. A., Dmitriev G. S., Ivanova E. A. *Energiya vetra — perspektivnyy vozobnovlyаемый energoresurs Murmanskoy oblasti* [Wind energy is a promising renewable energy resource in the Murmansk region]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2006, 73 p. (In Russ.).
52. Minin V. A., Dmitriev G. S. Vetroenergetika v usloviyakh Zapolyar'ya [Wind energy in the Arctic]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* [Energy: Economy, Technology, Ecology], 2006, No 7, pp. 20–25. (In Russ.).
53. Minin V. A., Dmitriev G. S. *Perspektivy osvoeniya netraditsionnykh i vozobnovlyаемых источников энергии na Kol'skom poluostrove* [Prospects for the development of non-traditional and renewable energy sources on the Kola Peninsula]. Murmansk, 2007, 92 p. (In Russ.).
54. Minin V. A., Dmitriev G. S. *Perspektivy ispol'zovaniya energii vetra i malykh GES v udalennykh rayonakh Murmanskoy oblasti* [Prospects for the use of wind energy and small hydroelectric power plants in remote areas of the Murmansk region]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2007, 97 p. (In Russ.).
55. Minin V. A., Dmitriev G. S., Ivanova E. A., Konovalova O. E., Moroshkina T. N. *Perspektivy ispol'zovaniya energii vetra i stoka r. Vud'yavryok dlya elektrosnabzheniya Polyarno-al'piyskogo botanicheskogo sada-instituta* [Prospects for the use of wind energy and the flow of the Vud'Yavryok River for power supply of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2005, 32 p. (In Russ.).
56. Bezhan A. V. Vetroenergetika Murmanskoy oblasti [Wind power industry of the Murmansk region]. *Elektricheskie stantsii* [Electrical Stations], 2017, No 7, pp. 51–55. (In Russ.).
57. Minin V. A. Regional'naya programma ispol'zovaniya vozobnovlyаемых источников энергии v Murmanskoy oblasti na period 2010–2015 gody [Regional program for the use of renewable energy sources in the Murmansk region for the period 2010–2015]. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy], 2009, No 5, pp. 39–45. (In Russ.).
58. Minin V. A. Regional'naya programma ispol'zovaniya vozobnovlyаемых источников энергии v Murmanskoy oblasti [Regional program for the use of renewable energy sources in the Murmansk region]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnogo kongressa “Dni chistoy energii v Peterburge”, Sankt-Peterburg, 15–16 aprelya 2010 g.* [Collection of materials of the International Congress “Days of Clean Energy in St. Petersburg”, Saint Petersburg, 15–16 April 2010]. Saint Petersburg, 2010, pp. 32–35. (In Russ.).

59. Minin V. A., Bezhan A. V. Perspektivy ispol'zovaniya energii vetra dlya teplosnabzheniya avtonomnykh potrebiteley Severa [Prospects for the use of wind energy for heat supply to autonomous consumers of the North]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnogo kongressa "Dni chistoy energii v Peterburge"*, Sankt-Peterburg, 15–16 aprelya 2010 g. [Collection of materials of the International Congress "Days of Clean Energy in St. Petersburg", Saint Petersburg, 15–16 April 2010], Saint Petersburg, 2010, pp. 61–65. (In Russ.).
60. Minin V. A. Resursy netraditsionnykh i возобновляемых источников энергии Мурманской области i priorityy ikh ispol'zovaniya [Resources of non-traditional and renewable energy sources of the Murmansk region and priorities for their use]. *Vestnik KNTS* [The bulletin of the KSC], 2010, No 1, pp. 94–101. (In Russ.).
61. Minin V. A. Regional'naya programma ispol'zovaniya возобновляемых источников энергии v Мурманской области [Regional program for the use of renewable energy sources in the Murmansk region]. *Ispol'zovanie возобновляемых energonositeley v stranakh mira*. Vypusk 1 [The use of renewable energy sources in the countries of the world. Issue 1]. Saint Petersburg, ООО "Advent RF", 2010, pp. 29–32. (In Russ.).
62. Minin V. A. Perspektivy primeneniya vetroenergeticheskikh ustanovok dlya teplosnabzheniya potrebiteley Severa [Prospects for the use of wind turbines for heat supply to consumers in the North]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering], 2003, No 1, pp. 48–53. (In Russ.).
63. Minin V. A., Dmitriev G. S. Perspektivy ispol'zovaniya energii vetra dlya teplosnabzheniya potrebiteley Severa [Prospects for the use of wind energy for heat supply to consumers in the North]. *Tekhniko-ekonomicheskie i elektrofizicheskie problemy razvitiya energetiki Severa* [Technical, economic and electrophysical problems of energy development in the North]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2007, pp. 40–49. (In Russ.).
64. Minin V. A., Bezhan A. V. *Perspektivy ispol'zovaniya energii vetra dlya teplosnabzheniya potrebiteley evropeyskogo Severa* [Prospects for the use of wind energy for heat supply to consumers in the European North]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2009, 56 p. (In Russ.).
65. Minin V. A. Otsenka perspektiv ispol'zovaniya energii vetra dlya teplosnabzheniya potrebiteley Severa [Assessment of the prospects for the use of wind energy for heat supply to consumers in the North]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering], 2009, No 11, pp. 34–40. (In Russ.).
66. Minin V. A. Perspektivy vklucheniya возобновляемых источников энергии v toplivno-energeticheskiy balans Мурманской области [Prospects for the inclusion of renewable energy sources in the fuel and energy balance of the Murmansk region]. *Malaya energetika* [Small Energy Industry], 2011, No 1–2, pp. 99–103. (In Russ.).
67. Barannik B. G., Konovalova O. E., Minin V. A. *Perspektivy sovershenstvovaniya energeticheskogo khozyaystva v rayonakh Severa za schyot ispol'zovaniya возобновляемых источников энергии* [Prospects for improving the energy sector in the regions of the North through the use of renewable energy sources]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2011, 154 p. (In Russ.).

Информация об авторе

В. А. Минин — кандидат технических наук, заведующий лабораторией.

Information about the author

V. A. Minin — PhD (Engineering), Head of Laboratory.

Статья поступила в редакцию 22.05.2024; одобрена после рецензирования 14.06.2024; принята к публикации 19.06.2024.
The article was submitted 22.05.2024; approved after reviewing 14.06.2024; accepted for publication 19.06.2024.