

ISSN 2949-1215



*Российская Академия Наук*  
**ТРУДЫ**  
Кольского научного центра РАН

**2/2024**(15)

**СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

0+

---

*Российская Академия Наук*  
**ТРУДЫ**

**2/2024(15)**

Научно-информационный журнал  
Основан в 2010 году  
Выходит 4 раза в год

**Кольского научного центра. Серия: Технические науки**

Главный редактор  
акад. РАН, д. г.-м. н. С. В. Кривовичев

Заместитель главного редактора  
к. б. н. Е. А. Боровичев

Редакционный совет:  
акад. РАН, д. г. н. Г. Г. Матишов,  
чл.-корр. РАН, д. б. н. В. К. Жиров,  
чл.-корр. РАН, д. т. н. А. И. Николаев,  
чл.-корр. РАН, д. х. н. И. Г. Тананаев,  
д. э. н. Ф. Д. Ларичкин,  
д. ф.-м. н. Е. Д. Терещенко,  
к. т. н. А. С. Карпов (отв. секретарь)

Редколлегия серии:  
чл.-корр. РАН, д. т. н. А. И. Николаев,  
чл.-корр. РАН, д. х. н. И. Г. Тананаев,  
д. т. н. А. В. Горохов,  
д. х. н. С. Р. Деркач,  
д. т. н. А. А. Козырев,  
д. т. н. Н. В. Коровкин,  
д. т. н. С. И. Кривошеев,  
д. х. н. С. А. Кузнецов,  
д. т. н. С. В. Лукичев,  
д. т. н. В. А. Марлей,  
д. т. н. М. В. Маслова,  
д. т. н. А. В. Маслобоев,  
д. т. н. В. А. Маслобоев,  
д. т. н. О. В. Наговицын,  
д. т. н. А. Г. Олейник,  
д. т. н. В. В. Рыбин,  
д. т. н. А. Я. Фридман,  
д. т. н. М. Г. Шишаев,  
к. т. н. Т. Н. Васильева,  
к. т. н. И. О. Датъев,  
к. х. н. Д. П. Домонов,  
к. т. н. О. Г. Журавлева,  
к. т. н. А. И. Калашник,  
к. т. н. А. С. Карпов,  
к. т. н. В. В. Колобов,  
к. т. н. Н. М. Кузнецов,  
к. т. н. С. М. Маслобоев,  
к. т. н. В. А. Минин,  
к. т. н. Г. И. Митрофанова,  
к. т. н. А. С. Опалев,  
к. т. н. В. Н. Селиванов,  
к. т. н. И. Э. Семенова,  
к. т. н. А. М. Фёдоров

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской  
академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН)

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-83502 от 30 июня 2022 г.  
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.

Научное издание

Технический редактор В. Ю. Жиганов  
Редактор Е. Н. Еремеева  
Подписано к печати 06.11.2024.  
Дата выхода в свет 13.11.2024.  
Формат бумаги 60 × 84 1/8.  
Усл. печ. л. 15,34. Заказ № 24. Тираж 300 экз.  
Свободная цена.

Адрес учредителя, издателя и типографии:  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Кольский научный центр РАН» (ФИЦ КНЦ РАН).  
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14.  
Тел.: 8 (81555) 7-53-50; 7-95-95, факс: 8 (81555) 7-64-25.  
E-mail: ksc@ksc.ru. www.ksc.ru.

Ответственный редактор номера  
В. В. Ивонин

**СОДЕРЖАНИЕ**

Минин В. А.	Ветроэнергетические исследования в Центре физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук за 50 лет.....	5
Кузнецов Н. М., Коновалова О. Е., Фёдоров О. В., Прохорова М. В.	Энергетика Республики Карелия.....	48
Лазарева М. А.	Возобновляемая энергетика для энергоснабжения децентрализованных районов Мурманской области.....	60
Лазарев Н. И.	Распределенная генерация и управление спросом: тандем для устойчивой энергетики будущего.....	67
Ярошевич В. В., Карпов А. С., Губская Е. И.	Исследование параметров электроэнергии Кольской ВЭС.....	73
Губская Е. И., Колобов В. В., Карпов А. С., Ярошевич В. В.	Компенсация реактивной мощности в сетях, питающих дуговые сталеплавильные печи.....	83
Бороздина Е. Д.	Высокочастотные эффекты в полевых измерениях частотно-зависимых параметров грунта.....	93
Селиванов В. Н., Кизенков А. Н., Сулоев А. А.	Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2023 году.....	101
Климов А. А., Колобов В. В., Потокин А. С.	Получение порошков синтетического кварца электроразрядным измельчением.....	111
Селиванов В. Н.	Памяти Бориса Васильевича Ефимова (18.05.1944 — 16.04.2023).....	123

2/2024(15)

Scientific journal  
Published since 2010  
Publication frequency — four times a year

*Russian Academy of Sciences*  
**TRANSACTIONS**

**Kola Science Centre. Series: Engineering Sciences**



Editor-in-Chief

S. V. Krivovichev, Academician of RAS,  
Dr. Sc. (Geology & Mineralogy)

Deputy Editor-in-Chief

E. A. Borovichev, PhD (Biology)

Editorial Council:

G. G. Matishov, Academician of RAS, Dr. Sc. (Geography),  
V. K. Zhiron, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Biology),  
A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Engineering),  
I. G. Tananaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Chemistry),  
F. D. Larichkin, Dr. Sc. (Economics),  
E. D. Tereshchenko, Dr. Sc. (Physics and Mathematics),  
A. S. Karpov, PhD (Engineering) — Executive Secretary

Editorial Board:

A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Engineering),  
I. G. Tananaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Chemistry),  
A. V. Gorokhov, Dr. Sc. (Engineering),  
S. R. Derkach, Dr. Sc. (Chemistry),  
A. A. Kozirev, Dr. Sc. (Engineering),  
N. V. Korovkin, Dr. Sc. (Engineering),  
S. I. Krivosheev, Dr. Sc. (Engineering),  
S. A. Kuznetsov, Dr. Sc. (Chemistry),  
S. V. Lukichev, Dr. Sc. (Engineering),  
V. A. Marlej, Dr. Sc. (Engineering),  
M. V. Maslova, Dr. Sc. (Engineering),  
A. V. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),  
V. A. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),  
O. V. Nagovitsin, Dr. Sc. (Engineering),  
A. G. Oleinik, Dr. Sc. (Engineering),  
V. V. Ribin, Dr. Sc. (Engineering),  
A. Ya. Fridman, Dr. Sc. (Engineering),  
M. G. Shishaev, Dr. Sc. (Engineering),  
T. N. Vasileva, PhD (Engineering),  
I. O. Datyev, PhD (Engineering),  
D. P. Domonov, PhD (Chemistry),  
O. G. Zhuravleva, PhD (Engineering),  
A. I. Kalashnik, PhD (Engineering),  
A. S. Karpov, PhD (Engineering),  
V. V. Kolobov, PhD (Engineering),  
N. M. Kuznetsov, PhD (Engineering),  
S. M. Masloboeva, PhD (Engineering),  
V. A. Minin, PhD (Engineering),  
G. I. Mitrofanova, PhD (Engineering),  
A. S. Opalev, PhD (Engineering),  
V. S. Selivanov, PhD (Engineering),  
I. E. Semenova, PhD (Engineering),  
A. M. Fedorov, PhD (Engineering)

Executive Editor

V. V. Ivonin

Founder — Federal State Budget Institution of Science  
Federal Research Centre “Kola Science  
Centre of the Russian Academy of Sciences”

Mass Media Registration Certificate  
ПИ No. ФС77-83502 issued by the Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology and Mass Media  
on June 30, 2022.

Scientific publication

Technical Editor V. Yu. Zhiganov  
Editor Ye. N. Yeremeyeva

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia.  
Tel.: 8 (81555) 7-93-80. Fax: 8 (81555) 7-64-25.  
E-mail: ksc@ksc.ru. www.ksc.ru.

**CONTENTS**

Minin V. A.	Wind energy research in NERC KSC RAS for 50 years.....	5
Kuznetsov N. M., Konovalova O. E., Fedorov O. V., Prokhorova M. V.	The energy sector of the Republic of Karelia.....	48
Lazareva M. A.	Renewable energy for the energy supply of decentralized areas of the Murmansk region.....	60
Lazarev N. I.	Distributed generation and demand response: a tandem for a sustainable energy of the future.....	67
Yaroshevich V. V., Karpov A. S., Gubskaya E. I.	Study of electric power parameters of the Kola Wind Farm.....	73
Gubskaya E. I., Kolobov V. V., Karpov A. S., Yaroshevich V. V.	Reactive power compensation in power systems supplying electric arc furnaces.....	83
Borozdina E. D.	High-frequency effects in field measurements of frequency-dependent soil properties.....	93
Selivanov V. N., Kizenkov A. N., Suloev A. A.	Analysis of the 2023 lightning activity in the Murmansk region.....	101
Klimov A. A., Kolobov V. V., Potokin A. S.	Production of synthetic quartz powders by electric discharge fragmentation.....	111
Selivanov V. N.	In memory of Boris Vasilyevich Efimov (18.05.1944 — 16.04.2023).....	123

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.

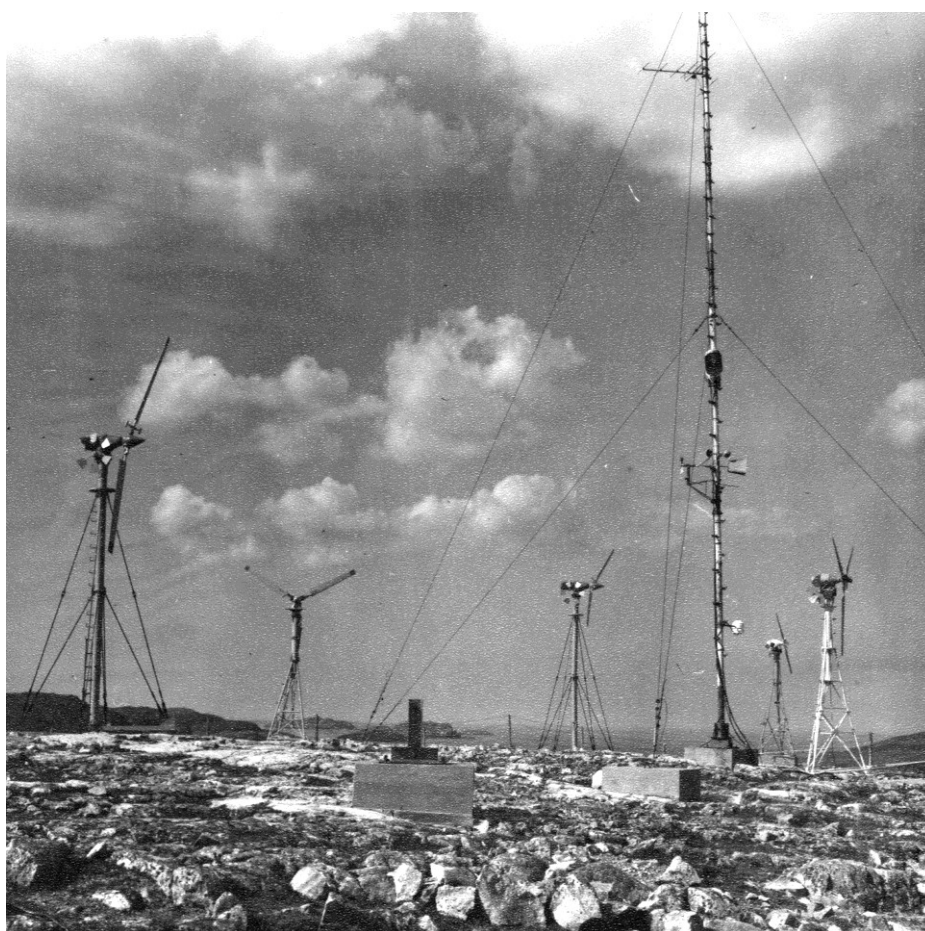
Можно отметить, что на возможность использования энергии ветра в заполярных районах Кольского полуострова, крайнем западном регионе Арктической зоны РФ, обращали внимание еще в 30–40-е гг. прошлого века. Уже тогда отмечалось, что для прибрежных арктических районов с их бескрайними просторами характерны 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 (4кВт), 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  $-23 \dots -25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как в центральных районах Кольского полуострова этот показатель достигает  $-30 \dots -35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  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

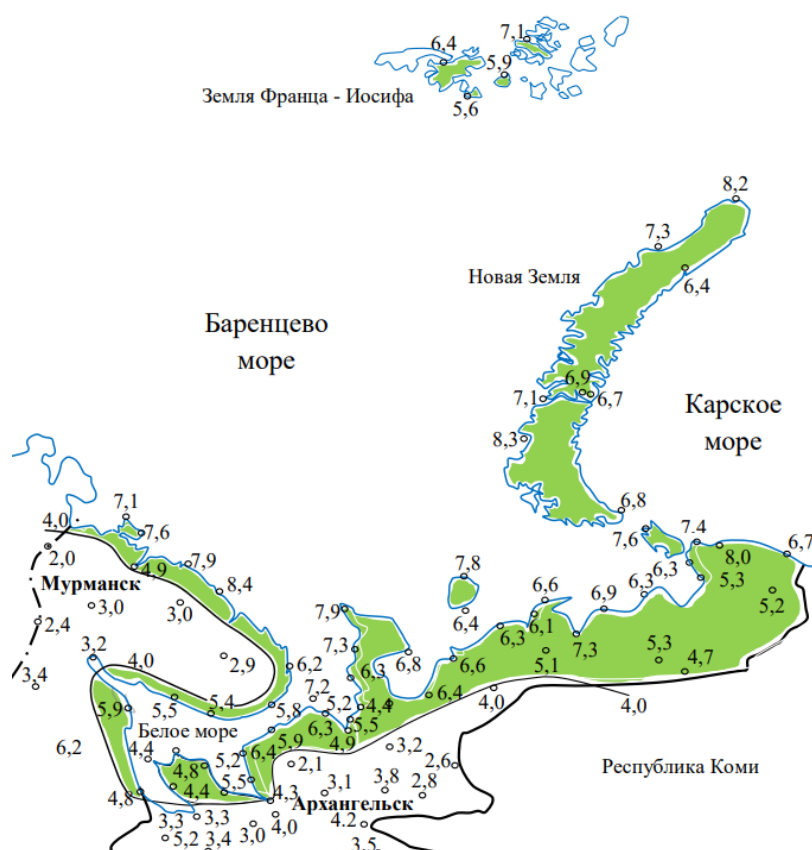


**Рис. 5.** Заведующий Отделом энергетики д. т. н. И. Р. Степанов (в центре) знакомит чл.-корр. РАН М. В. Костенко и чл.-корр. РАН Н. Н. Ковалёва с устройством ВЭУ  
**Fig. 5.** The head of the Energy Department, D.Sc. I. R. Stepanov (in the centre) introduces the design of the wind turbine to corresponding 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 ознакомилась 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 (CREC). 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; *b* — 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, *b* — 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 Маегаард (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 Fucuoka, 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

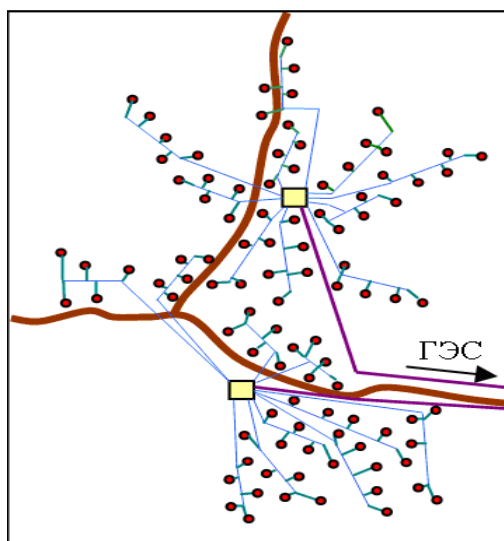
Выдача мощности и энергии от ветропарков возможна по существующим линиям электропередачи напряжением 150 и 330 кВ. Во избежание перегрузки ЛЭП выдача энергии может осуществляться в компенсационном режиме, то есть со снижением мощности ГЭС при устойчивом сильном ветре. Благодаря этому в водохранилище 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 регулирующими 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-Наволок, 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 Вудьяврюк, 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.

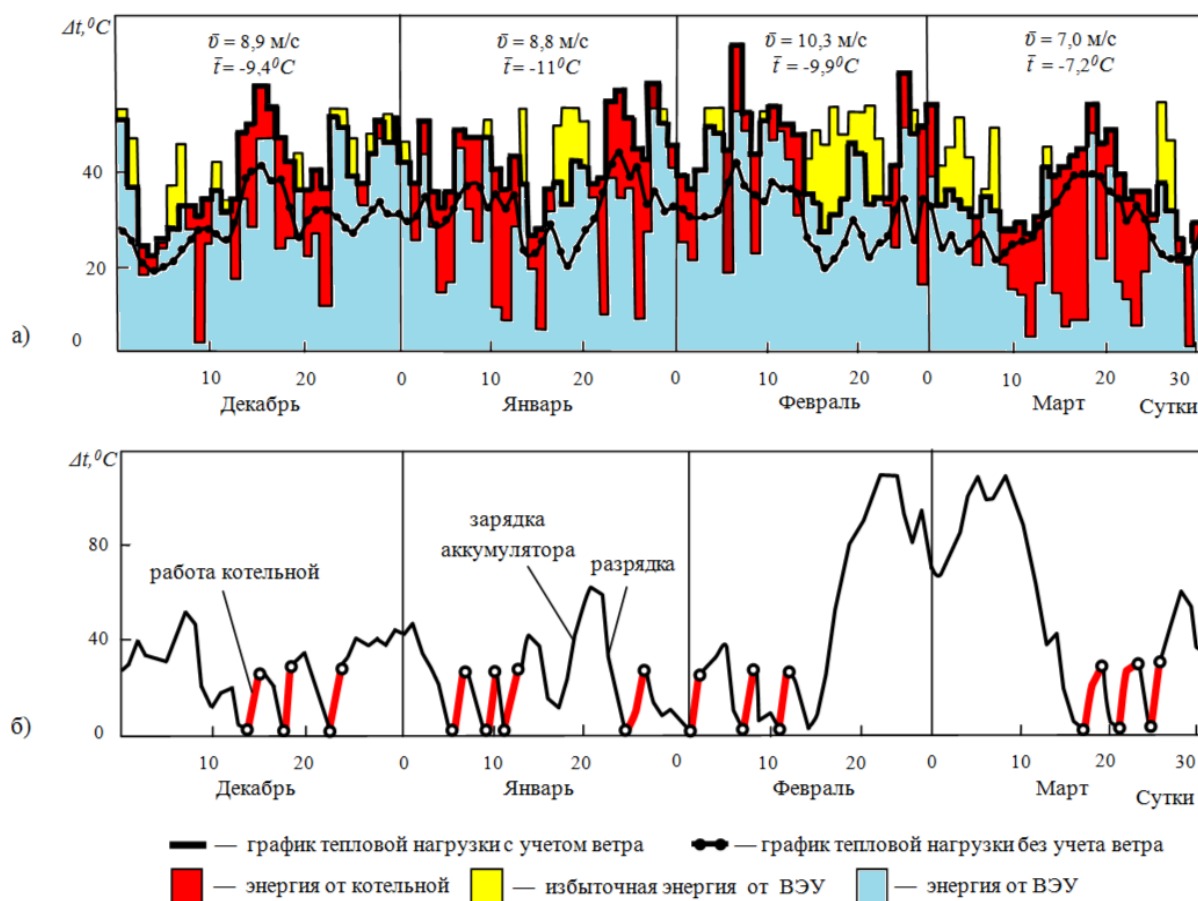
### **Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей**

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.

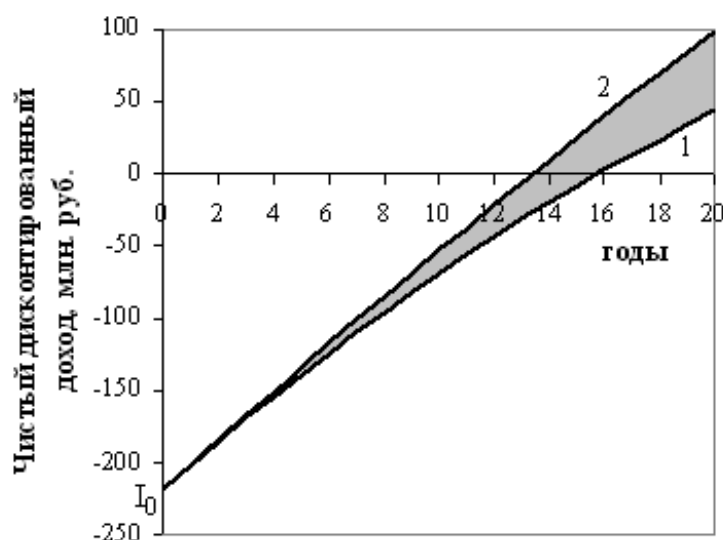


**Рис. 23.** Покрытие отопительной нагрузки в декабре-марте комплексом «ВЭУ + котельная» (а) и возможная работа теплового аккумулятора (б)  
**Fig. 23.** Covering the heating load in December-March with the complex “wind turbine + boiler house” (a) and possible operation of a thermal battery (b)

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.

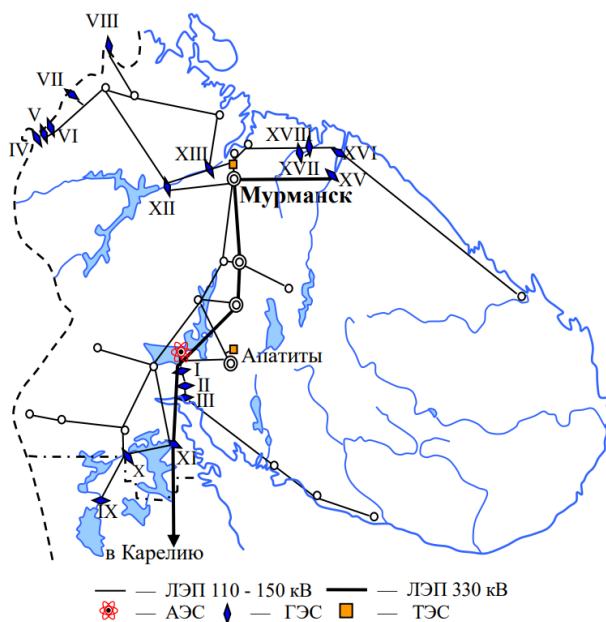


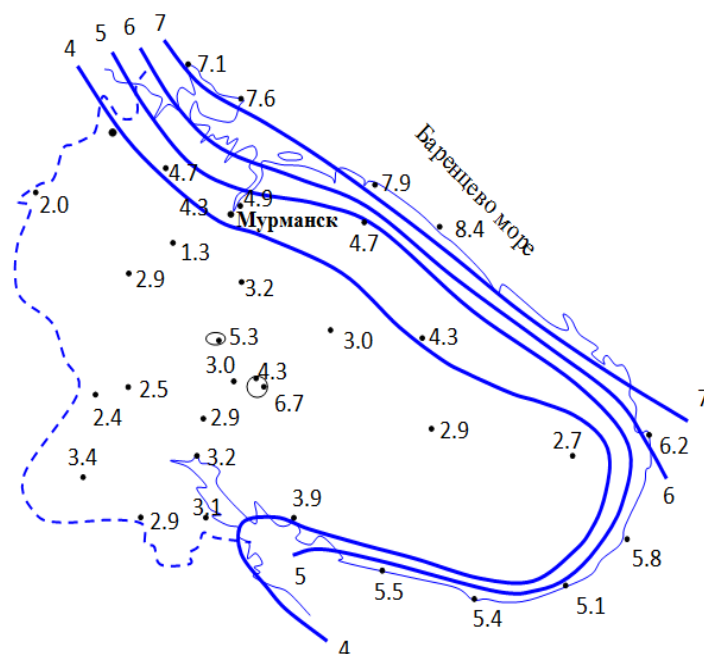
Рис. 25. Схема электрических сетей Кольской энергосистемы  
Fig. 25. The diagram of electrical grids of the Kola energy system

### 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.

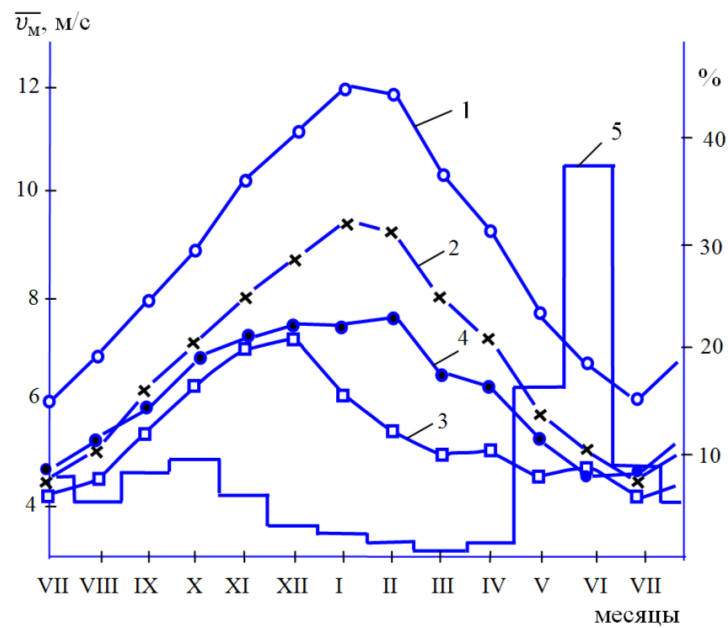


**Рис. 26.** Средние многолетние скорости ветра (м/с) на высоте 10 м от поверхности земли в условиях открытой ровной местности

**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).

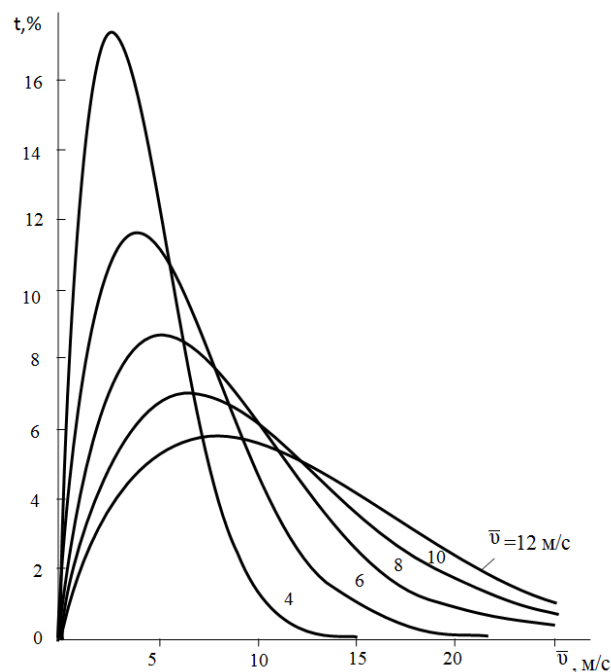


**Рис. 27.** Годовой ход среднемесячных скоростей ветра на островах (1), побережье (2) Баренцева моря, на побережье Белого моря (3), в Хибинах (4) и гидрограф рек (5):

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

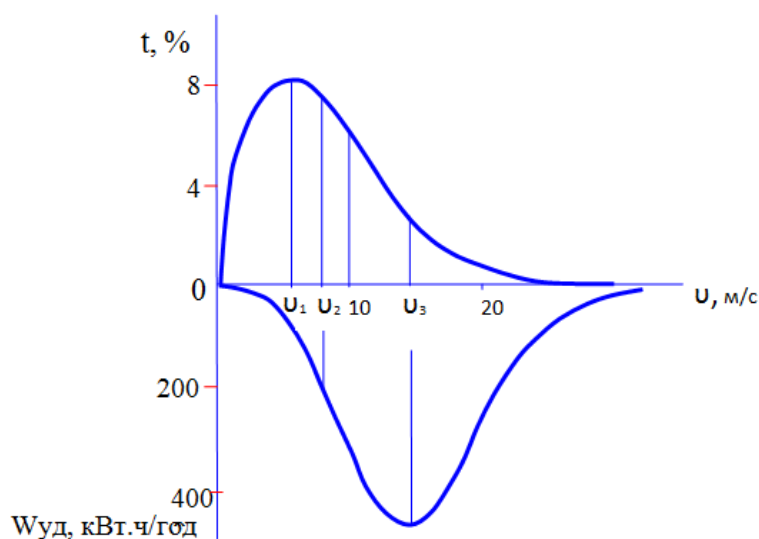


**Рис. 28.** Кривые повторяемости скоростей ветра при различных среднегодовых скоростях

**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 м<sup>2</sup> 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.

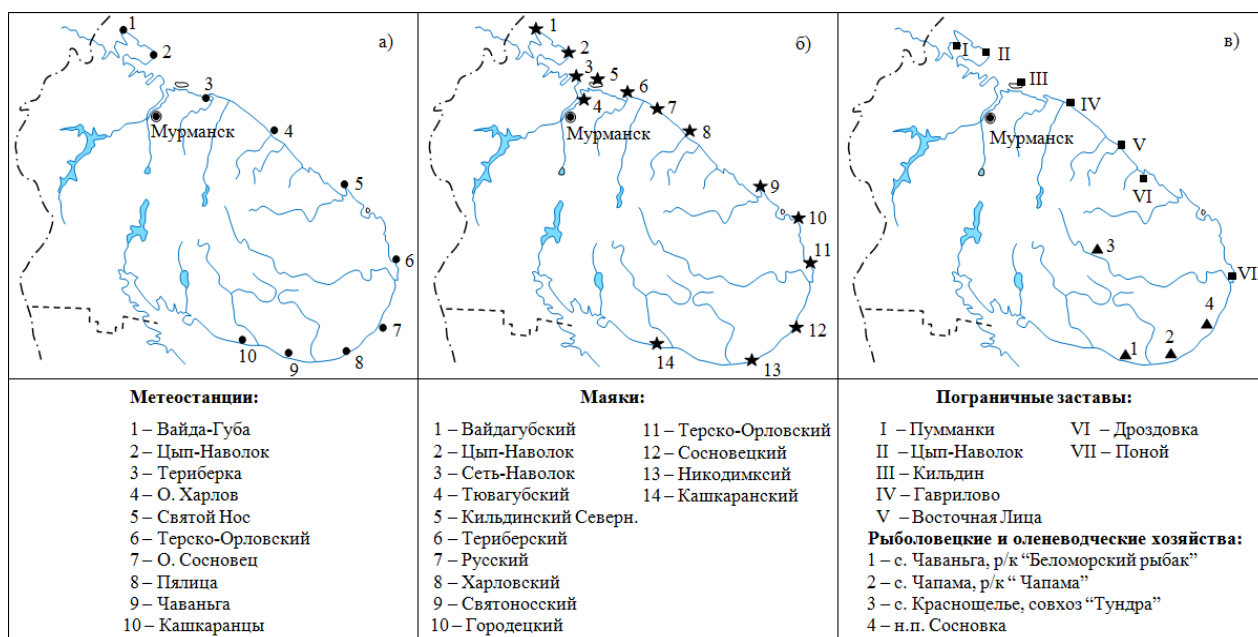
Примерно в 100 километрах восточнее Мурманска располагаются Серебрянские и Териберские ГЭС суммарной мощностью около 500 МВт, которые могут сыграть положительную роль в развитии системной ветроэнергетики. К этому району имеется транспортная доступность по автомобильной дороге, здесь может быть построено 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. Bezrukih [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 4<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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 / V. Efimov [et al.] // Abstracts of the 4<sup>th</sup> 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. Ruyhatunturi, 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. Вудьяврйок 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 poluoostrova [Some results of the study of the energy characteristics of the wind of the Kola Peninsula]. *Voprosy energetiki Kol'skogo poluoostrova* [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 poluoostrova [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 ветров России* [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 4<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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. *Kontsepsiya 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 vozobnovlyaemykh istochnikov energii v Rossii* [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 Murmanska* [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. Murmanska [Experience in installation and operation of a network wind turbine near Murmansk]. *Elektricheskies 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 vozobnovlyaemyy energoresurs Murmanskoj 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 vozobnovlyaemykh istochnikov energii 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 Murmanskoj 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 Murmanskoj oblasti [Wind power industry of the Murmansk region]. *Elektricheskies stantsii* [Electrical Stations], 2017, No 7, pp. 51–55. (In Russ.).
57. Minin V. A. Regional'naya programma ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii v Murmanskoj 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 vozobnovlyaemykh istochnikov energii v Murmanskoj 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 vozobnovlyaemykh istochnikov energii Murmanskoy oblasti i priorityty 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 vozobnovlyaemykh istochnikov energii v Murmanskoy oblasti [Regional program for the use of renewable energy sources in the Murmansk region]. *Ispol'zovanie vozobnovlyaemykh energonositeley v stranakh mira*. Vypusk 1 [The use of renewable energy sources in the countries of the world. Issue 1]. Saint Petersburg, OOO "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 vozobnovlyaemykh istochnikov energii v toplivno-energeticheskiy balans Murmanskoy oblasti [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., Konvalova O. E., Minin V. A. *Perspektivy sovershenstvovaniya energeticheskogo khozyaystva v rayonakh Severa za schyot ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii* [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.



Научная статья  
УДК 620.9  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.002

## ЭНЕРГЕТИКА РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ

**Николай Матвеевич Кузнецов<sup>1</sup>, Ольга Евгеньевна Коновалова<sup>2</sup>,  
Олег Васильевич Фёдоров<sup>3</sup>, Марина Вячеславовна Прохорова<sup>4</sup>**

<sup>1, 2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>3, 4</sup>Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>1</sup>n.kuznetsov@ksc.ru

### Аннотация

В статье рассматривается состояние топливно-энергетического комплекса Республики Карелия на современном этапе развития. Определена структура потребления электростанциями и котельными по видам топлива. Энергетический комплекс республики энергодефицитен и зависит от привозного топлива. Энергетическая система региона работает в составе энергосистемы Северо-Запада. Приведена структура установленной мощности по типам электростанций с группировкой по принадлежности энергокомпаниям. Основными производителями электрической энергии являются гидроэлектростанции. Показана динамика потребления электрической энергии и структура потребления электроэнергии по видам экономической деятельности. Основную долю в структуре потребления электроэнергии и тепловой энергии составляет промышленное производство. Для зоны децентрализованного энергоснабжения предусматривается создание каскадов малых гидроэлектростанций, замещение неэффективной дизельной генерации электроэнергии генерацией на базе сжиженного природного газа, возобновляемых источников энергии и местного топлива, что позволит повысить энергетическую эффективность производства и потребления энергоресурсов, снизить энергоёмкость производимой продукции, уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

### Ключевые слова:

Карелия, топливо, газоснабжение, электроэнергетика, электростанции, теплоснабжение, децентрализованное энергоснабжение

### Благодарности:

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

Original article

## THE ENERGY SECTOR OF THE REPUBLIC OF KARELIA

**Nikolai M. Kuznetsov<sup>1</sup>, Olga E. Konovalova<sup>2</sup>, Oleg V. Fedorov<sup>3</sup>, Marina V. Prokhorova<sup>4</sup>**

<sup>1, 2</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

<sup>3, 4</sup>Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>1</sup>n.kuznetsov@ksc.ru

### Abstract

The state of the fuel and energy complex of the Republic of Karelia at the present stage of development is considered. The structure of consumption by power plants and boiler houses by fuel types is determined. The energy complex of the republic is energy deficient and depends on imported fuel. The energy system of the region operates as part of the energy system of the Northwest. The structure of installed capacity by types of power plants with grouping by ownership of power companies is given. The main producers of electric energy are hydroelectric power plants. The dynamics of electricity consumption and the structure of electricity consumption by types of economic activity are shown. The main share in the structure of electricity and heat consumption is industrial production. It is planned to create cascades of small hydroelectric power plants for the decentralized energy supply zone. Replacing inefficient diesel power generation with generation based on liquefied natural gas, renewable energy sources and local fuel, which will increase the energy efficiency of production and consumption of energy resources, reduce the energy intensity of manufactured products, and reduce the negative impact on the environment.

**Keywords:**

Karelia, fuel, gas supply, power industry, power plants, heat supply, decentralized energy supply

**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).

**Введение**

Особенностями территорий Арктической зоны Российской Федерации в социально-экономическом развитии являются: экстремальные природно-климатические условия, низкая плотность населения, слабый уровень развития транспортной и социальной инфраструктуры, высокая чувствительность экологических систем к внешним воздействиям, ориентированность экономики регионов на добычу природных ресурсов. Республика Карелия входит в состав Северного экономического региона Северо-Западного федерального округа (СЗФО) Российской Федерации. *Арктические территории:* районы Кемский, Лоухский, Беломорский, Сегежский, Калевальский, Костомукшский городской округ. Население арктических территорий составляет 18,3 % [1].

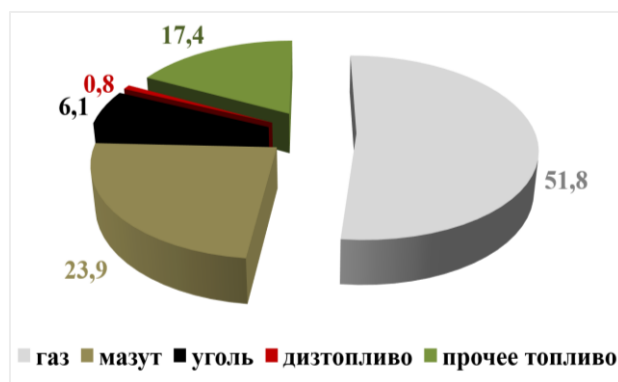
Полезные ископаемые представлены запасами железных руд [2], титана, ванадия, молибдена, благородных металлов, алмазов, слюды, строительных материалов, керамического сырья. Более половины территории республики занято лесом. Основными отраслями являются добыча полезных ископаемых, металлургия, камнеобработка, машиностроение, лесная, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная и рыбная промышленность. Сельское хозяйство представлено такими отраслями, как животноводство (преимущественно молочное, а также мясное скотоводство), свиноводство, форелеводство, птицеводство, звероводство, растениеводство. Выращиваются кормовые культуры. Развито пушное звероводство, рыболовство. Водные ресурсы карельской части Арктической зоны Российской Федерации активно используются для нужд гидроэнергетики [3]. Экономика региона потенциально обеспечена энергоресурсами, но их добыча и производство затруднены ограниченностью финансовых средств [4].

**Потребление топливно-энергетических ресурсов**

Топливный баланс Республики Карелия включает следующие виды энергоресурсов:

- уголь и продукты его переработки (кокс металлургический, коксовый газ и отходящие газы металлургических процессов);
- нефть сырая и газовый конденсат;
- продукты переработки нефти (бензин, керосин, дизельное топливо, мазут, углеводородные газы);
- природный газ;
- прочее топливо (торф и торфобрикеты, древесина топливная, древесные топливные гранулы (пеллеты), отходы деревообрабатывающего производства, твердые бытовые отходы и т. п.).

Структура потребления по видам топлива электростанциями и котельными приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Структура потребления по видам топлива, %  
**Fig. 1.** Structure of consumption by fuel types, %

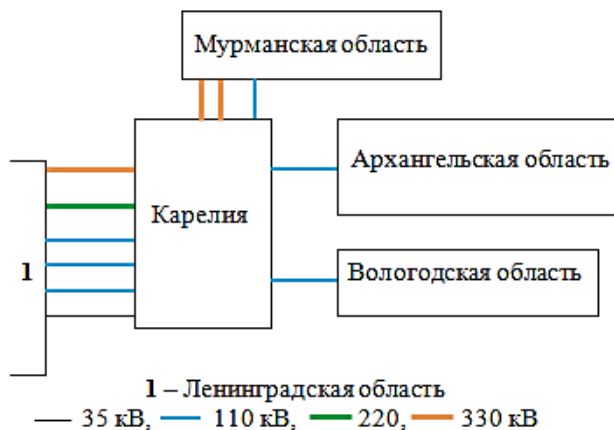
Газоснабжение потребителей Республики Карелия природным газом осуществляется ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» через систему газопроводов-отводов и межпоселковых газораспределительных сетей АО «Газпром газораспределение Петрозаводск». В соответствии с Генеральной схемой газоснабжения и газификации Республики Карелия [5] удаленные от сетей газоснабжения районы (Беломорский, Кемский, Калевальский, Лоухский) планируется газифицировать сжиженным природным газом (СПГ) путем формирования комплекса по производству и доставке СПГ до предполагаемых потребителей автомобильным транспортом и создания системы хранения и регазификации СПГ.

Для снижения энергоемкости валового регионального продукта в регионе большое значение уделяется энергосбережению [6], которое должно быть взаимосвязано с методами управления конкурентоспособностью региона и проработкой мотивирующих факторов ключевых экономических агентов [7].

### Электросетевой комплекс

Электроэнергетика является базовой отраслью. Динамичное развитие промышленности, (металлургии, целлюлозно-бумажной, деревообрабатывающей промышленности, горного комплекса и т. д.), социально-культурных объектов, естественный рост потребления электрической энергии в бытовом секторе, а также реализация национальных проектов требуют ввода дополнительных электрических мощностей, развития электросетевого хозяйства, ориентированного на строительство цифровых высоковольтных подстанций, создание цифрового района электрических сетей [8], что является необходимым условием для социально-экономического развития Республики Карелия. Энергетический комплекс характеризуется как энергодефицитный и зависит от привозных видов топлива. Собственное производство электроэнергии покрывает порядка 60 % от его общего потребления [9].

Энергетическая система региона работает в составе объединенной энергосистемы Северо-Запада, имеет межсистемные связи линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 35–330 кВ с энергосистемами Мурманской, Ленинградской, Вологодской, Архангельской областей (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема линий электропередачи напряжением 35–330 кВ в Карелии  
**Fig. 2.** Scheme of 35–330 kV power transmission lines in Karelia

Общая протяженность линий электропередачи напряжением 35–330 кВ составляет 7488,5 км, в том числе линий электропередачи напряжением 330 кВ — 903,3 км; 220 кВ — 1137,2 км; 110 кВ — 2904 км; 35 кВ — 2544 км. Магистральные линии электропередачи напряжением 220–330 кВ эксплуатируются филиалом ПАО «ФСК ЕЭС» — карельским предприятием магистральных электрических

сетей, распределительные сети воздушных линий (ВЛ) и кабельных линий (КЛ) напряжением 110 кВ и менее — Карельским филиалом ПАО «МРСК Северо-Запада» и территориальными сетевыми организациями.

На рынке электрической энергии Республики Карелия осуществляют деятельность следующие субъекты электроэнергетики (табл. 1).

Таблица 1

Направления деятельности субъектов электроэнергетики  
Areas of activity of electric power industry entities

Субъекты электроэнергетики	Генерация энергии	Сетевая компания	Сбытовая компания
Филиал «Карельский» ПАО «ТГК-1»	ТЭЦ, ГЭС, МГЭС		
Филиал ПАО «ФСК ЕЭС»		220–330 кВ: 9 ПС 1931,5 МВА; 2015,935 км ЛЭП 110–330 кВ	
Карельский филиал ПАО «МРСК Северо-Запада»		35–110 кВ: 152 ПС 1831,7 МВА; 4678,2 км ВЛ и КЛ	
АО «Прионежская сетевая компания»	ДЭС, СЭС	0,4–110 кВ: 1583 ТП и РП; 4737,76 км ЛЭП	
АО «Объединённые региональные электрические сети Петрозаводска»		Г. Петрозаводск, пос. Кварцитный	
Филиал ОАО «РЖД»		ВЛ и ПС 6(10)–220 кВ	
АО «Карельский окатыш»		Костомукшский городской округ	
АО «ТНС Энерго Карелия»			Все районы Республики Карелия
Октябрьский филиал ООО «Русэнергосбыт»			Потребители от электросетей ОАО «РЖД»
ООО «Энергокомфорт Карелия»			Петрозаводский городской округ, пос. Кварцитный

На территории Республики Карелия осуществляют деятельность территориальные электросетевые компании, которые владеют электросетевым хозяйством менее 35 кВ: АО «Объединённые региональные электрические сети Карелии», филиал «Северо-Западный» АО «Оборонэнерго», Петрозаводский филиал ООО «Энергозащита», Филиал ООО «ЭнергоХолдинг» по Республике Карелия. Направлениями деятельности компаний являются техническое и оперативное обслуживание сетей электроснабжения; проведение плановых текущих и капитальных ремонтов; текущая эксплуатация электросетевого хозяйства; модернизация и реконструкция сетей; технологическое присоединение вводимых объектов; обслуживание, проверка, установка и опломбирование приборов учета электроэнергии и др.

Централизованное оперативно-диспетчерское управление в пределах энергосистемы Республики Карелия для субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, влияющих на электроэнергетический режим работы, осуществляет филиал АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Республики Карелия».

*Производство электрической энергии.* На начало 2021 г. 25 электростанций общей мощностью 1178,1 МВт работают в составе ОЭС Северо-Запада (21 гидроэлектростанция — ГЭС, 4 тепловые электростанции — ТЭС). Объем произведенной электроэнергии в 2020 г. составил 5468 млн кВт·ч (без учета выработки Кумской гидроэлектростанции, расположенной на территории Карелии, но организационно входящей в энергосистему Мурманской области).

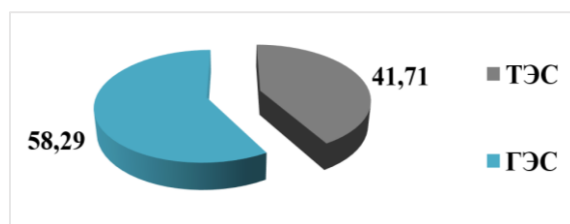
В таблице 2 приведены перечень электростанций Республики Карелия и их установленная мощность с группировкой по принадлежности энергокомпаниям.

Структура установленной мощности по типам электростанций представлена на рис. 3.

Таблица 2

Электростанции Республики Карелия  
 Power plants of the Republic of Karelia

Собственник	Тип	Наименование	Установленная мощность, МВт
Филиал «Карельский ПАО ТГК-1»	ТЭЦ	Петрозаводская ТЭЦ	280
	ГЭС	Каскад Кемских ГЭС	330
		Путкинская ГЭС (ГЭС-9)	84
		Подужемская ГЭС (ГЭС-10)	48
		Кривопорожская ГЭС (ГЭС-14)	180
		Юшкозерская ГЭС (ГЭС-16)	18
		Каскад Выгских ГЭС	160
		Маткожненская ГЭС (ГЭС-3)	63
		Выгостровская ГЭС (ГЭС-5)	40
		Беломорская ГЭС (ГЭС-6)	27
		Палакоргская ГЭС (ГЭС-7)	30
		Каскад Сунских ГЭС:	50,6
		Кондопожская ГЭС (ГЭС-1)	25,6
		Пальеозерская ГЭС (ГЭС-2)	25
		Малые ГЭС АО «Норд Гидро»	13,1
		Питкякоски (ГЭС-19)	1,28
		Хямекоски (ГЭС-21)	3,54
Харлу (ГЭС-22)	3		
Пиени-Йоки (ГЭС-24)	1,28		
Суури-Йоки (ГЭС-25)	1,28		
Игнойла (ГЭС-26)	2,7		
<i>Всего по филиалу «Карельский ПАО ТГК-1»</i>			833,7
ООО «ЕвроСибЭнерго — тепловая энергия»	ГЭС	Ондская ГЭС (ГЭС-4)	80
АО «Кондопожский ЦБК»	ТЭС	ТЭС АО «Кондопожский ЦБК»	108
		ТЭС-1	48
		ТЭС-2	60
АО «Сегежский ЦБК»	ТЭЦ, ТЭС	ТЭС АО «Сегежский ЦБК»	48
		ТЭЦ-1	24
		ТЭС-2	24
ООО «РК-Гранд»	ТЭЦ	ТЭЦ ООО «РК-Гранд»	22
АО «Норд Гидро»	ГЭС	Малые ГЭС АО «Норд Гидро»	6,405
		Малая ГЭС Ляскеля ГЭС	4,8
		Малая ГЭС Рюмякоски ГЭС	0,63
		Малая ГЭС Каллиокоски ГЭС	0,975
<i>Всего по территории Карелии</i>			1098,105



**Рис. 3.** Структура установленной мощности по типам электростанций, %  
**Fig. 3.** Structure of installed capacity by type of power plants, %

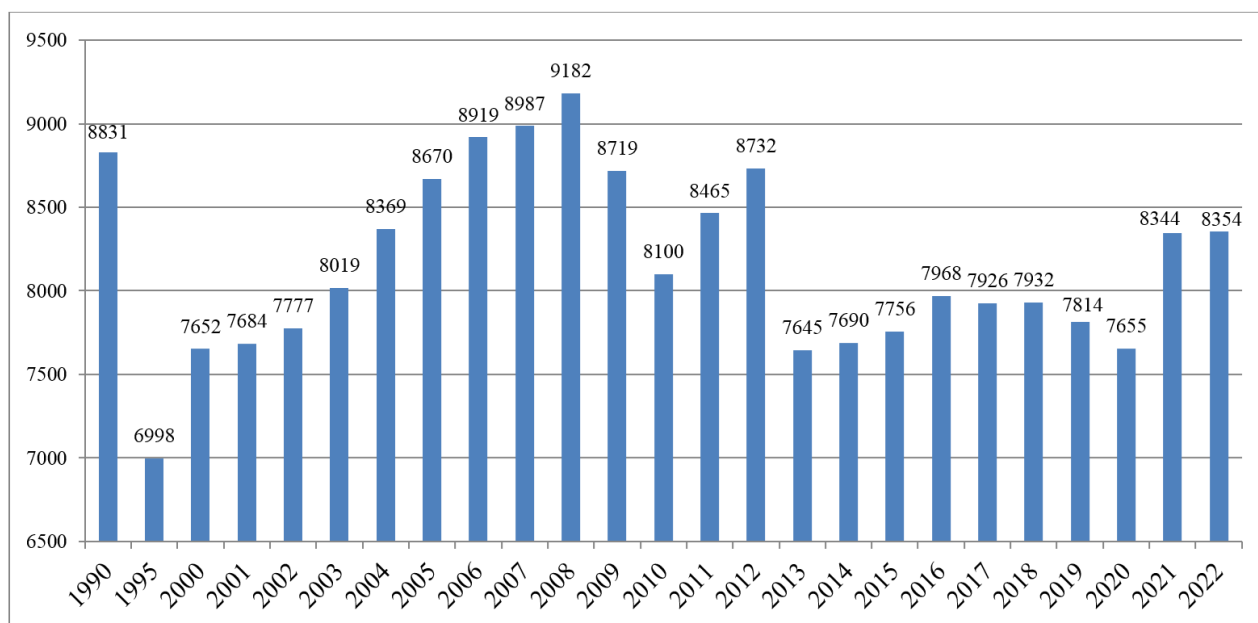
Основным производителем электрической и тепловой энергии на территории Республики Карелия является *Филиал «Карельский» ПАО «ТГК-1»*, в собственности которого находится десять крупных гидроэлектростанций, шесть малых гидроэлектростанций в составе *каскада Сунских ГЭС* и одна теплоэлектроцентраль (установленная электрическая мощность — 280 МВт; установленная тепловая мощность — 689,0 Гкал/ч) суммарной установленной электрической мощностью 833,7 МВт.

### Потребление электроэнергии

Карелия является энергодефицитным регионом по потреблению электроэнергии и сбалансированным по установленной мощности. В 2022 г. общее потребление по территории республики составило 8354 млн кВт·ч (рис. 4).

Основную долю в структуре потребления электрической энергии (рис. 5) составляет промышленное производство (60 %), доля населения в энергопотреблении составляет 9 %.

Основными промышленными потребителями электроэнергии являются АО «Карельский окатыш» (20 %), Кондопожский ЦБК (20 %), Сегежский ЦБК (5 %).



**Рис. 4.** Потребление электроэнергии за 1990–2022 гг., млн кВт·ч [10]  
**Fig. 4.** Electricity consumption for 1990–2022, million kWh [10]

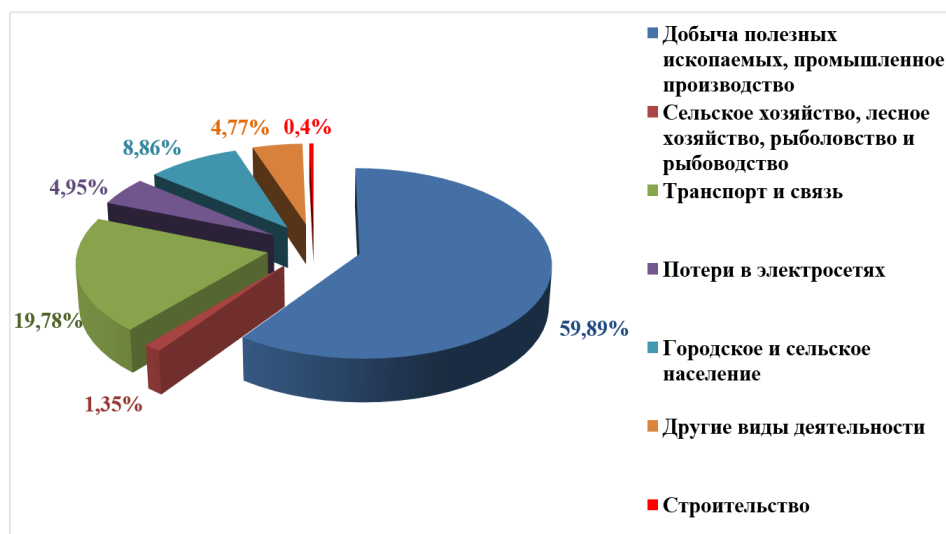


Рис. 5. Структура потребления электроэнергии по видам деятельности [1]  
 Fig. 5. Structure of electricity consumption by type of activity [1]

### Теплоснабжение

Выработка тепловой энергии в основном осуществляется на тепловых электростанциях промышленных предприятий (88,5 %), котельные вырабатывают 11,5 % теплоэнергии. Общая тепловая мощность источников теплоснабжения составляет 3313 Гкал/ч, в том числе тепловые электростанции — 1603 Гкал/ч. Производство тепловой энергии — 6124 тыс. Гкал. Структура отпуска тепловой энергии источниками теплоснабжения за 2020 г. представлена на рис. 6.

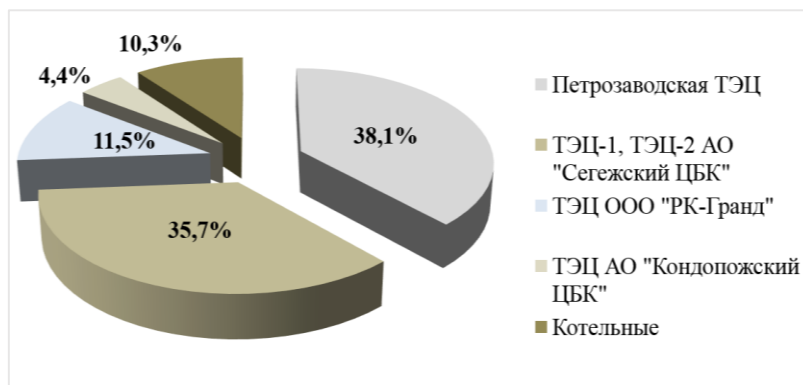


Рис. 6. Структура отпуска тепловой энергии  
 Fig. 6. Structure of heat energy release

Крупнейшей электростанцией региона и основным источником теплоснабжения города Петрозаводска является *Петрозаводская ТЭЦ*. Паротурбинная теплоэлектроцентраль в качестве топлива с 1996 г. использует природный газ. Это позволило значительно уменьшить выброс вредных веществ в окружающую среду и обеспечить более надежное энергоснабжение потребителей. Турбоагрегаты станции введены в эксплуатацию в 1979–1982 гг. Оборудование станции включает три турбоагрегата (один мощностью 60 МВт и два по 110 МВт), три котлоагрегата производительностью по 420 т/час. Установленная электрическая мощность станции — 280 МВт, тепловая мощность — 689 Гкал/час, выработка электроэнергии — 1281,7 млн кВт·ч, выработка тепловой энергии — 1811,17 тыс. Гкал [11].

Потребление тепловой энергии промышленностью составляет 3800 тыс. Гкал. Структура потребления тепловой энергии промышленным производством с разделением по видам представлена на рис. 7.



Рис. 7. Потребление тепловой энергии промышленным производством, %  
Fig. 7. Consumption of thermal energy by industrial production, %

Основное потребление тепловой энергии приходится на обрабатывающее производство (производство бумаги и бумажных изделий — 80 %, обработка древесины — 11,5 %). Наиболее крупными промышленными потребителями тепловой энергии являются АО «Сегежский ЦБК», АО «Кондопожский ЦБК», ООО «РК-Гранд» и АО «Карельский окатыш».

#### Энергетика зоны децентрализованного энергоснабжения

Энергоснабжение потребителей северных регионов [12–14] приобретает распределенный характер с использованием экологически чистых источников энергии: ветровой, солнечной, энергии малых рек. Комплексное использование возобновляемых источников энергии различного типа для автономного энергообеспечения отдаленных потребителей позволяет увеличить надежность энергоснабжения [15; 16] и повысить эффективность использования установленной мощности возобновляемых источников энергии.

В зоне децентрализованного энергоснабжения в Карелии потребители обеспечиваются энергией от 8 дизельных электростанций общей мощностью 3,4 МВт и от 5 солнечных электростанций общей мощностью 61 кВт. В изолированных от энергосистемы и труднодоступных населенных пунктах на территории Сегежского, Муезерского, Кондопожского и Калевальского муниципальных районов расположены восемь дизельных электростанций (ДЭС) и пять солнечных электростанций (СЭС): пос. Валдай — ДЭС 1640 кВт; дер. Полга — ДЭС 152 кВт; пос. Возмозеро — ДЭС 23 кВт, СЭС 8 кВт; с. Реболы — ДЭС 1280 кВт; пос. Кимоваара — ДЭС 112 кВт, СЭС 32 кВт; пос. Войница — ДЭС 80 кВт, СЭС 12 кВт; дер. Юстозеро — ДЭС 16 кВт, СЭС 3 кВт; дер. Линдозеро — ДЭС 22 кВт, СЭС 6 кВт. Для обеспечения электроэнергией туристического комплекса на реке Чирка-Кемь в Киви-Койву Муезерского района в 1995 г. введена в работу микроГЭС мощностью 60 кВт (3 гидроагрегата «МикроГЭС-20ПрД» по 20 кВт с диагональными турбинами производства фирмы «ИНСЭТ», работающими на напоре 14 м) [17].

*Ветроэнергетика.* В трех муниципальных районах республики (Кемский, Беломорский, Медвежьегорский) средняя скорость ветра превышает 3,5 м/с, что достаточно для работы мощных ветроэлектрических установок. В остальных районах целесообразно строительство малых ветроустановок для локального энергоснабжения удаленных потребителей.

*Развитие малых ГЭС.* В настоящее время ведется реконструкция и возведение малых гидроэлектростанций на территории Республики Карелия. В 2014 г. завершен комплекс инженерных изысканий под размещение объектов гидротехнических сооружений, выполнены проектно-



изыскательские работы по инвестиционным проектам строительства малой ГЭС в пос. Реболы, МГЭС «Белопорожская ГЭС-1» и МГЭС «Белопорожская ГЭС-2». Сдерживающим фактором на пути сооружения каскадов малых ГЭС [18] является рыбохозяйственное значение большинства рек, а также вопросы подключения к сетям малых ГЭС [19; 20].

*Использование местного вида топлива.* Согласно стратегии развития топливной отрасли республики на основе местных энергетических ресурсов большинство муниципальных образований обладают сырьевой базой для полного удовлетворения потребности коммунальной энергетики (дрова, топливная щепка, торф). Однако распределение древесных ресурсов по территории неравномерно, их доступные объемы не всегда могут обеспечить годовую потребность в биотопливе для источников теплоснабжения некоторых муниципальных образований, стоимость дров ежегодно увеличивается. Имеются запасы торфа во всех районах республики. В пос. Харлу введен в эксплуатацию источник комбинированной выработки тепловой и электрической энергии (3 МВт) из газифицированного торфа. Организована промышленная добыча торфа в Пряжинском национальном, Суоярвском, Пудожском муниципальных районах. В 2012 г. реализован инвестиционный проект модернизации схемы теплоснабжения пос. Эссойла Пряжинского национального муниципального района с переводом котельной на сжигание местного топлива (торф, щепка). За счет собственных средств ООО «Питэр Пит» завершило реконструкцию котельной установленной мощностью 1,5 МВт в селе Вешкелица Суоярвского муниципального района. Рассматриваются два направления по увеличению доли использования местного топлива: полное замещение энергетическим торфом (щепой) ископаемого топлива (угля, мазута, дизельного топлива); комбинированное сжигание каменного угля и энергетического торфа (в пропорции 80/20 %) без дополнительного переоборудования котельных.

## **Заключение**

Основными направлениями реализации государственной политики Российской Федерации по развитию топливно-энергетического комплекса и энергетической инфраструктуры в Республике Карелия являются: создание каскадов малых гидроэлектростанций при условии подтверждения перспективного спроса на электроэнергию и их экономической эффективности; проведение последовательной политики энергосбережения и повышения эффективности использования энергетических ресурсов, ориентированной на устойчивое сбалансированное инновационное развитие инфраструктуры топливно-энергетического комплекса и обеспечение экономики республики энергоресурсами.

## **Список источников**

1. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Республики Карелия на 2021–2025 годы. URL: [https://gov.karelia.ru/legal\\_acts/161619/](https://gov.karelia.ru/legal_acts/161619/) (дата обращения: 05.10.2022).
2. Совершенствование методов эколого-экономической оценки процессов добычи и переработки железной руды корпораций арктической зоны России на основе математического моделирования / С. В. Тишков [и др.] // Горная промышленность. 2022. № 2. С. 112–119. doi:10.30686/1609-9192-2022-2-112-119.
3. Водохозяйственный комплекс карельской части Арктической зоны Российской Федерации: современное состояние и динамика / А. В. Литвиненко [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 2. С. 280–296. doi:10.25283/2223-4594-2023-2-280-296.
4. Повышение энергоэффективности экономики Арктической зоны Российской Федерации: проблемы, перспективы, методы оценки / С. В. Тишков [и др.]. М.: Первое экономическое издательство, 2021. 126 с.
5. Региональная программа «Газификация жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций на территории Республики Карелия на 2022–2030 годы». URL: [https://gov.karelia.ru/upload/iblock/c56/120r\\_P.pdf](https://gov.karelia.ru/upload/iblock/c56/120r_P.pdf) (дата обращения: 21.11.2022).

6. Тишков С. В., Щербак А. П. Энергоэффективность и энергосбережение как факторы повышения конкурентоспособности экономики Северного приграничного региона (на примере Республики Карелия) // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. Т. 15, № 4. С. 40–45. doi:10.14529/power150406.
7. Бурый О. В. Оценка системы управления энергосбережением в экономике северных регионов // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2018. № 4 (36). С. 136–143. doi:10.19110/1994-5655-2018-4-136-143.
8. Интеллектуальные системы учета как инструмент снижения потерь электрической энергии / Т. А. Мусаев [и др.] // Строительство: новые технологии — новое оборудование. 2021. № 2. С. 52–55. EDN: GDPLEJ.
9. Иванов А. В., Складчиков А. А., Хренников А. Ю. Развитие электроэнергетики арктических регионов Российской Федерации с учетом использования возобновляемых источников энергии // Российская Арктика. 2021. № 2 (13). С. 62–80. doi:10.24412/2658-4255-20212-62-80.
10. Потребление энергии по субъектам Российской Федерации. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/el-potr.xls> (дата обращения: 02.12.2022).
11. Петрозаводская ТЭЦ. URL: <https://www.tgc1.ru/production/complex/karelia-branch/petrozavodskaya-chpp/> (дата обращения: 22.09.2023).
12. Лебедева М. А. Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в регионах Крайнего Севера России // Проблемы развития территории. 2021. Т. 25, № 4. С. 139–155. doi:10.15838/ptd.2021.4.114.8.
13. Citizens' Behavior as a Driver of Energy Transition and Greening of the Economy in the Russian Arctic: Findings of a Sociological Survey in the Murmansk Region and Karelia / S. Tishkov [et al.] // Appl. Sci. 2022. Vol. 12, No 3. 1460. doi:10.3390/app12031460.
14. Volotkovskaya N. S., Semenov A. S., Fedorov O. V. Feasibility of Energy Sector Development and Optimization Program of the Republic of Sakha (Yakutia) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. 082033. doi:10.1088/1757-899X/753/8/082033.
15. Кузнецов Н. М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2020. 92 с.
16. Кузнецов Н. М., Минин В. А., Селиванов В. Н. Развитие Кольской энергосистемы в интересах горнопромышленного комплекса Мурманской области // Горный журнал. 2020. № 9. С. 96–100. doi:10.17580/gzh.2020.09.14.
17. Минигидроэлектростанция «Киви-Койву». URL: <https://inset.ru/realizovannye-proekty/kivi-kojvu/> (дата обращения: 22.09.2023).
18. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033> (дата обращения: 28.09.2022).
19. Коновалова О. Е., Никифорова Г. В. Малая возобновляемая энергетика на северо-западе Арктики // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 1 (35). С. 117–131. EDN: WMAKUP.
20. Коновалова О. Е. Энергетическое использование возобновляемых речных ресурсов Северного экономического района РФ // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10, № 5 (18). С. 57–69. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2019.5.57-69.

## References

1. *Skhema i programma perspektivnogo razvitiya elektroenergetiki Respubliki Kareliya na 2021–2025 gody* [Scheme and program for the long-term development of the electric power industry of the Republic of Karelia for 2021–2025]. (In Russ.). Available at: [https://gov.karelia.ru/legal\\_acts/161619/](https://gov.karelia.ru/legal_acts/161619/) (accessed 05.10.2022).
2. Tishkov S. V., Volkov A. D., Kulakov K. A., Shchiptsov V. V. Sovershenstvovanie metodov ekologo-ekonomicheskoy otsenki protsessov dobychi i pererabotki zheleznoy rudy korporatsiy arkticheskoy zony Rossii na osnove matematicheskogo modelirovaniya [Improvement of environmental and economic assessment methods of mining and processing of iron ore by corporations of the Arctic zone of the Russian Federation based on mathematical modeling]. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], 2022, No 2, pp. 112–119. (In Russ.). doi:10.30686/1609-9192-2022-2-112-119.

3. Litvinenko A. V., Litvinova I. A., Bogdanova M. S., Filatov N. N. Vodokhozyaystvennyy kompleks karel'skoy chasti Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: sovremennoe sostoyanie i dinamika [Water management complex of the Karelian part of the Russian Arctic zone: current state and dynamics]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: Ecology and Economy], 2023, Vol. 13, No. 2, pp. 280–296. (In Russ.). doi:10.25283/2223-4594-2023-2-280-296.
4. Tishkov S. V., Nalivaychenko E. V., Volkov A. D., Shcherbak A. P., Karginova-Gubinova V. V., Pakhomova A. A. *Povyshenie energoeffektivnosti ekonomiki Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: problemy, perspektivy, metody otsenki* [Improving the energy efficiency of the economy of the Arctic zone of the Russian Federation: problems, prospects, assessment methods]. Moscow, Pervoe ekonomicheskoe izdatel'stvo, 2021, 126 p. (In Russ.).
5. *Regional'naya programma "Gazifikatsiya zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva, promyshlennykh i inykh organizatsiy na territorii Respubliki Kareliya na 2022–2030 gody"* [The regional programme "Gasification of housing and communal services, industrial and other organizations in the Republic of Karelia for 2022–2030"]. (In Russ.). Available at: [https://gov.karelia.ru/upload/iblock/c56/120r\\_P.pdf](https://gov.karelia.ru/upload/iblock/c56/120r_P.pdf) (accessed 21.11.2022).
6. Tishkov S. V., Shcherbak A. P. Energoeffektivnost' i energosberezhenie kak faktory povysheniya konkurentosposobnosti ekonomiki Severnogo prigranichnogo regiona (na primere Respubliki Kareliya) [Energy efficiency and conservation as factors of competitiveness of the economy of the Northern Border Region (on the example of the Republic of Karelia)]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2015, Vol. 15, No. 4, pp. 40–45. (In Russ.). doi:10.14529/power150406.
7. Buryy O. V. Otsenka sistemy upravleniya energosberezheniem v ekonomike severnykh regionov [Assessment of energy saving management system in the economy of the Northern Regions]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the RAS], 2018, No. 4 (36), pp. 136–143. (In Russ.). doi:10.19110/1994-5655-2018-4-136-143.
8. Musaev T. A., Fedorov O. V., Shageev S. R., Prokhorova M. V. Intellektual'nye sistemy uchyota kak instrument snizheniya poter' elektricheskoy energii [Intelligent metering systems as a tool for reducing electrical energy losses]. *Stroitel'stvo: novye tekhnologii — novoe oborudovanie* [Construction: New Technologies — New Equipment], 2021, No. 2, pp. 52–55. (In Russ.). EDN: GDPLEJ.
9. Ivanov A. V., Skladchikov A. A., Khrennikov A. Yu. Razvitie elektroenergetiki arkticheskikh regionov Rossiyskoy Federatsii s uchyotom ispol'zovaniya vozobnovlyаемых источников energii [Development of electric power industry in the Arctic Regions of the Russian Federation, considering the use of renewable energy sources]. *Rossiyskaya Arktika* [The Russian Arctic], 2021, No. 2 (13), pp. 62–80. (In Russ.). doi:10.24412/2658-4255-20212-62-80.
10. *Potreblenie energii po sub"ektam Rossiyskoy Federatsii* [Energy consumption by regions of the Russian Federation]. (In Russ.). Available at: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/el-potr.xls> (accessed 02.12.2022).
11. *Petrozavodskaya TETs* [Petrozavodsk CHP plant]. (In Russ.). Available at: <https://www.tgc1.ru/production/complex/karelia-branch/petrozavodskaya-chpp/> (accessed 22.09.2023).
12. Lebedeva M. A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya vozobnovlyаемой energetiki v regionakh Kraynego Severa Rossii [The state and prospects of renewable energy development in the regions of the Far North of Russia]. *Problemy razvitiya territorii* [Problems of Territory Development], 2021, Vol. 25, No. 4, pp. 139–155. (In Russ.). doi:10.15838/ptd.2021.4.114.8.
13. Tishkov S., Tleppayev A., Karginova-Gubinova V., Volkov A., Shcherbak A. Citizens' Behavior as a Driver of Energy Transition and Greening of the Economy in the Russian Arctic: Findings of a Sociological Survey in the Murmansk Region and Karelia. *Appl. Sci.*, 2022, Vol. 12, No 3, 1460. doi:10.3390/app12031460.
14. Volotkovskaya N. S., Semenov A. S., Fedorov O. V. Feasibility of Energy Sector Development and Optimization Program of the Republic of Sakha (Yakutia). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 753, 082033. doi:10.1088/1757-899X/753/8/082033.

15. Kuznetsov N. M. *Upravlenie energoeffektivnost'yu v regionakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii* [Energy efficiency management in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2020, 92 p. (In Russ.).
16. Kuznetsov N. M., Minin V. A., Selivanov V. N. Razvitie Kol'skoy energosistemy v interesakh gornopromyshlennogo kompleksa Murmanskoy oblasti [Kola power network development for the sake of the mining industry in the Murmansk Region]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2020, No 9, pp. 96–100. (In Russ.). doi:10.17580/gzh.2020.09.14.
17. *Minigidroelektrostantsiya "Kivi-Koyvu"* [Mini hydroelectric power station "Kivi-Koyvu"]. (In Russ.). Available at: <https://inset.ru/realizovannye-proekty/kivi-kojvu/> (accessed 22.09.2023).
18. *Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2035 goda* [Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035]. (In Russ.). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033> (accessed 28.09.2022).
19. Konovalova O. E., Nikiforova G. V. Malaya vozobnovlyаемaya energetika na severo-zapade Arktiki [Small renewable energy sector in the north-west of the Arctic]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS], 2016, No 1 (35), pp. 117–131. (In Russ.). EDN: WMAKUP.
20. Konovalova O. E. Energeticheskoe ispol'zovanie vozobnovlyаемых rechnykh resursov Severnogo ekonomicheskogo rayona RF [The energy use of renewable river resources of the Northern Economic Region of the Russian Federation]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS], 2019, Vol. 10, No. 5 (18), pp. 57–69. (In Russ.). doi:10.25702/KSC.2307-5252.2019.5.57-69.

#### ***Информация об авторах***

**Н. М. Кузнецов** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

**О. Е. Коновалова** — инженер;

**О. В. Фёдоров** — доктор технических наук, профессор;

**М. В. Прохорова** — кандидат социологических наук, доцент.

#### ***Information about the authors***

**N. M. Kuznetsov** — PhD (Engineering), Leading Researcher;

**O. E. Konovalova** — Engineer;

**O. V. Fedorov** — D.Sc. (Engineering), Professor;

**M. V. Prokhorova** — PhD (Sociological), Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 09.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 01.03.2024.  
The article was submitted 09.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 01.03.2024.

Научная статья  
УДК 620.9  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.003

## **ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ РАЙОНОВ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Мария Алексеевна Лазарева**

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

### **Аннотация**

В статье рассматривается потенциал использования возобновляемых источников энергии для электроснабжения удаленных децентрализованных районов Мурманской области. Проводится оценка пригодности и ограничений их использования в суровых климатических условиях Кольского полуострова, что открывает возможности для дальнейшего развития и внедрения. Подчеркивается ключевая роль возобновляемой энергетики в обеспечении устойчивого и надежного электроснабжения в отдаленных и труднодоступных районах, что может способствовать социально-экономическому развитию региона и сокращению зависимости от ископаемого топлива.

### **Ключевые слова:**

возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, энергия ветра, энергия малых рек, дизельные электростанции

### **Благодарности:**

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

Original article

## **RENEWABLE ENERGY FOR THE ENERGY SUPPLY OF DECENTRALIZED AREAS OF THE MURMANSK REGION**

**Mariya A. Lazareva**

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

### **Abstract**

The article examines the potential of using renewable energy sources to supply electricity to remote decentralized areas of the Murmansk region. The suitability and limitations of their use in the harsh climatic conditions of the Kola Peninsula are being assessed, which opens up opportunities for further development and implementation. The key role of renewable energy in ensuring sustainable and reliable electricity supply in remote and hard-to-reach areas is emphasized, which can contribute to the socio-economic development of the region and reduce dependence on fossil fuels.

### **Keywords:**

renewable energy sources, solar energy, wind energy, small river energy, diesel power plants

### **Acknowledgments:**

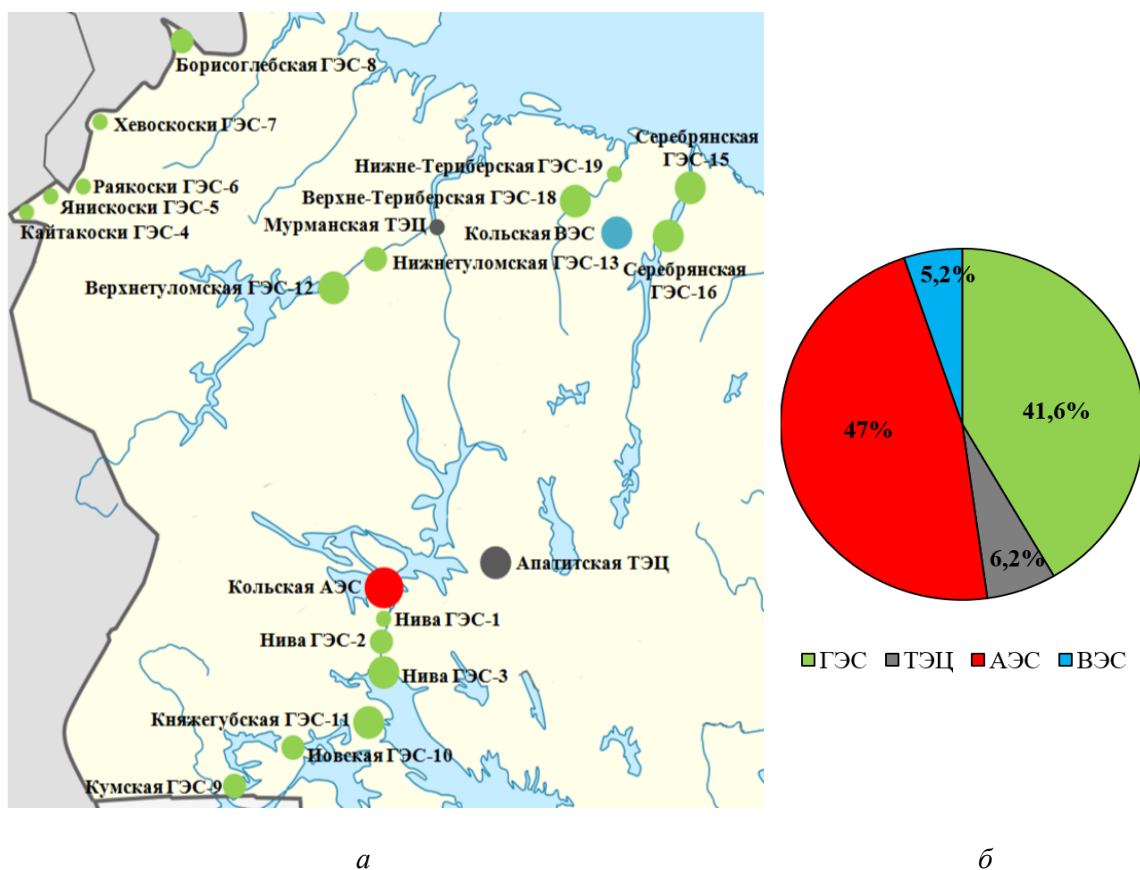
The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

В последние десятилетия изменение климата стало одной из наиболее актуальных проблем во всем мире. Чрезмерные выбросы парниковых газов в атмосферу приводят к повышению средней температуры на планете, что, в свою очередь, может привести к серьезным последствиям для окружающей среды и здоровья людей. Одним из способов борьбы с изменением климата является переход от традиционных источников энергии к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ).

Россия является одной из ведущих стран в мире по запасам и добыче различных видов топлива. В частности, она обладает огромным запасом нефти, газа, угля и других ископаемых ресурсов, что позволяет стране не только обеспечивать свои внутренние потребности в энергии, но и экспортировать ресурсы на мировой рынок. Несмотря на свою обеспеченность ископаемым

топливом, Россия активно развивает сектор возобновляемой энергетики. По разным регионам виды ВИЭ существенно варьируются. Мурманская область является регионом, в котором также развивается данный сектор.

Электроэнергетическая система региона представляет собой сложную и разветвленную структуру, которая объединяет в себе различные источники энергии. В ее состав входят 17 гидроэлектростанций, административно объединенных в 3 каскада, 2 тепловые электростанции, 1 атомная электростанция. Также с недавнего времени частью энергетической системы региона стала ветроэлектростанция (рис. 1, а) [1]. Доля ВИЭ в централизованном электроснабжении достаточно велика (рис. 1, б). Их использование позволяет снизить зависимость от традиционных видов топлива и обеспечить более устойчивое развитие региона. Кольская энергосистема хорошо развита, что позволяет ей не только обеспечивать электроэнергией собственные потребности, но и экспортировать излишки в соседние регионы. Данная энергетическая система представляет собой сбалансированный и устойчивый комплекс, который обеспечивает надежное электроснабжение и способствует экономическому и экологическому развитию региона.



**Рис. 1.** Электрические станции Мурманской области (а) и структура мощностей Кольской энергосистемы в 2022 г. (б)  
**Рис. 1.** Power plants of the Murmansk region (а) and the capacity structure of the Kola power system in 2022 (б)

Однако значительная часть территории Мурманской области представлена децентрализованными районами, которые характеризуются удаленностью от основных энергетических сетей, что затрудняет обеспечение их надежным и доступным электроснабжением. В связи с этим использование ВИЭ может стать эффективным решением предоставления устойчивого и экологически чистого электроснабжения в этих районах.

Мурманская область расположена на северо-западе России и является одним из самых северных регионов страны. Климат региона характеризуется как субарктический в северной части и умеренно холодный в южной. Несмотря на сложившиеся суровые климатические условия, Мурманская область обладает огромным потенциалом для развития ВИЭ.

Кольский полуостров получает значительное количество солнечной энергии в течение года. Анализ данных, полученных на актинометрических станциях Мурманской области, свидетельствует о том, что при учете реальной облачности годовое поступление суммарной солнечной радиации составляет в среднем 650–850 кВт·ч/м<sup>2</sup> (рис. 2) [2].

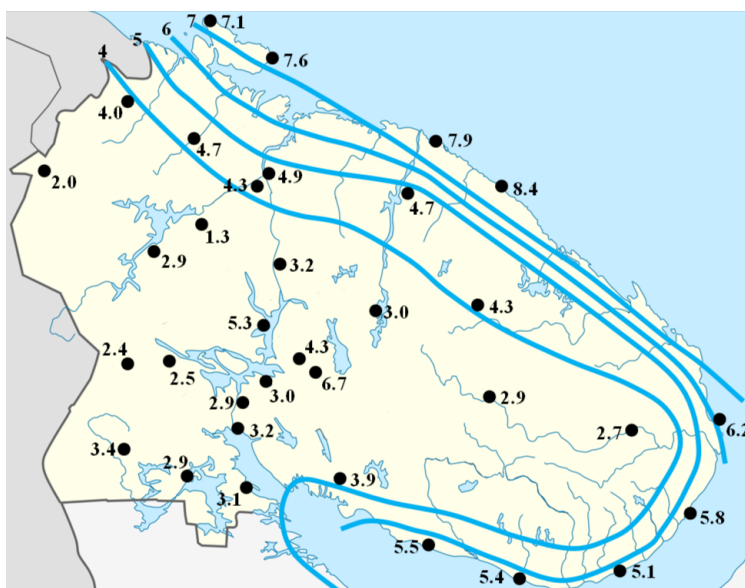


**Рис. 2.** Поступление солнечной энергии на территорию Мурманской области (кВт·ч/м<sup>2</sup>)  
**Fig. 2.** Solar energy supply to the territory of the Murmansk region (kWh/m<sup>2</sup>)

Однако в зимний период наблюдается резкий дефицит или полное отсутствие солнечного света, совпадающее с пиковым спросом на энергоресурсы. Другим ограничивающим фактором для использования солнечной энергии на Кольском полуострове является высокая циклоническая активность, приводящая к малому количеству дней с ясной погодой. Это снижает эффективность солнечных энергоустановок, ограничивая их применение для небольших изолированных потребителей, испытывающих трудности с доставкой традиционных источников энергии.

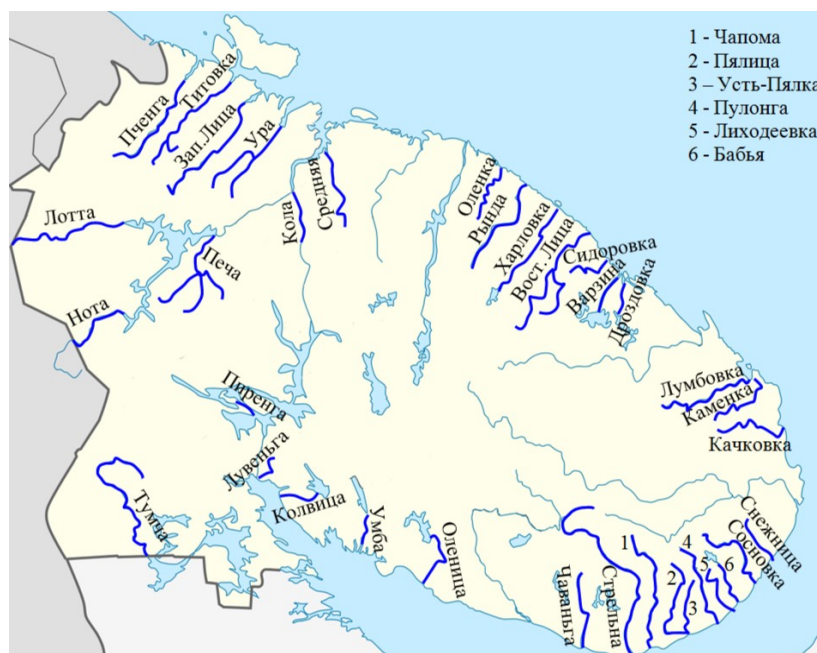
В то же время Мурманская область обладает исключительными ветроэнергетическими ресурсами. Результаты анализа 20-летних данных о скоростях ветра с 37 метеостанций полуострова показывают, что средние многолетние скорости ветра 7–9 м/с наблюдаются в прибрежных районах Баренцева моря. Значения этих скоростей постепенно снижаются по мере удаления от берега (рис. 3) [3].

Для Кольского полуострова характерен зимний максимум скоростей ветра, что является идеальной предпосылкой для эффективного использования энергии ветра. Пик скоростей ветра совпадает с сезонным спросом на тепло- и электроэнергию. Энергетический потенциал ветра на Кольском полуострове огромен. При размещении ветроустановок с расстоянием между ними, равным 10 диаметрам турбин, их суммарная мощность может достичь 120 млн кВт, обеспечивая годовую выработку электроэнергии около 360 млрд кВт·ч. Эти прогнозы показывают, что ветроэнергетические ресурсы региона намного превосходят текущие потребности в электроэнергии, предоставляя возможности для их дальнейшего развития и вовлечения в хозяйственный оборот.



**Рис. 3.** Средние многолетние скорости ветра (м/с) на высоте 10 м от поверхности земли в условиях открытой ровной местности  
**Fig. 3.** Average perennial wind speeds (m/s) at a height of 10 m from the surface of the earth in conditions of open, flat terrain

Потенциал малых рек Мурманской области (рис. 4) для производства электроэнергии оценивается в 4,4 млрд кВт·ч в год с возможной суммарной среднегодовой мощностью малых ГЭС 516 МВт [4]. Сооружение малых ГЭС в регионе не является новым направлением, однако в 1960-е гг. они были вытеснены более дешевыми дизельными установками.



**Рис. 4.** Малые реки Мурманской области  
**Fig. 4.** Small rivers of the Murmansk region



В настоящее время дизельные генераторы имеют ряд недостатков, включая высокую стоимость топлива, загрязнение окружающей среды и зависимость от поставок. В связи с этим интерес к использованию энергии малых рек возрос. Для строительства малых ГЭС на Кольском полуострове пригодны многочисленные створы, но не все они расположены вблизи потенциальных потребителей. Благоприятные условия для сооружения малых ГЭС имеются в прибрежных населенных пунктах, расположенных вблизи устья рек, впадающих в Белое и Баренцево моря, а также в некоторых объектах центральных и западных районов области.

Ввиду суровых климатических условий эксплуатация энергоустановок, использующих ВИЭ, в Мурманской области становится недостаточно эффективной. Однако их совместное применение вместе с дизельными электростанциями позволит решить данную проблему. Дизельные генераторы будут обеспечивать надежное электроснабжение в периоды, когда ВИЭ не смогут закрыть потребность в электроэнергии. В то же время в более благоприятных условиях ВИЭ будут использоваться для снижения нагрузки на дизельных установках, что позволит экономить топливо и повысить экологическую безопасность. Такое сочетание обеспечит бесперебойное электроснабжение децентрализованных районов.

Эксплуатация гибридных электростанций активно применяется на побережье Белого моря, в Терском районе (рис. 5). С 2014 по 2016 г. там была проведена модернизация систем электроснабжения отдаленных населенных пунктов, таких как Чаваньга, Тетрино, Чапома и Пялица, путем внедрения ветросолнечнодизельных установок. Результатом строительства комплексных электростанций стало обеспечение потребителей электроэнергией круглосуточно и сокращение регионального бюджетного финансирования за счет уменьшения объемов используемого топлива. Также модернизация систем электроснабжения позволила снизить себестоимость электроэнергии и увеличить срок службы дизельных установок [5].

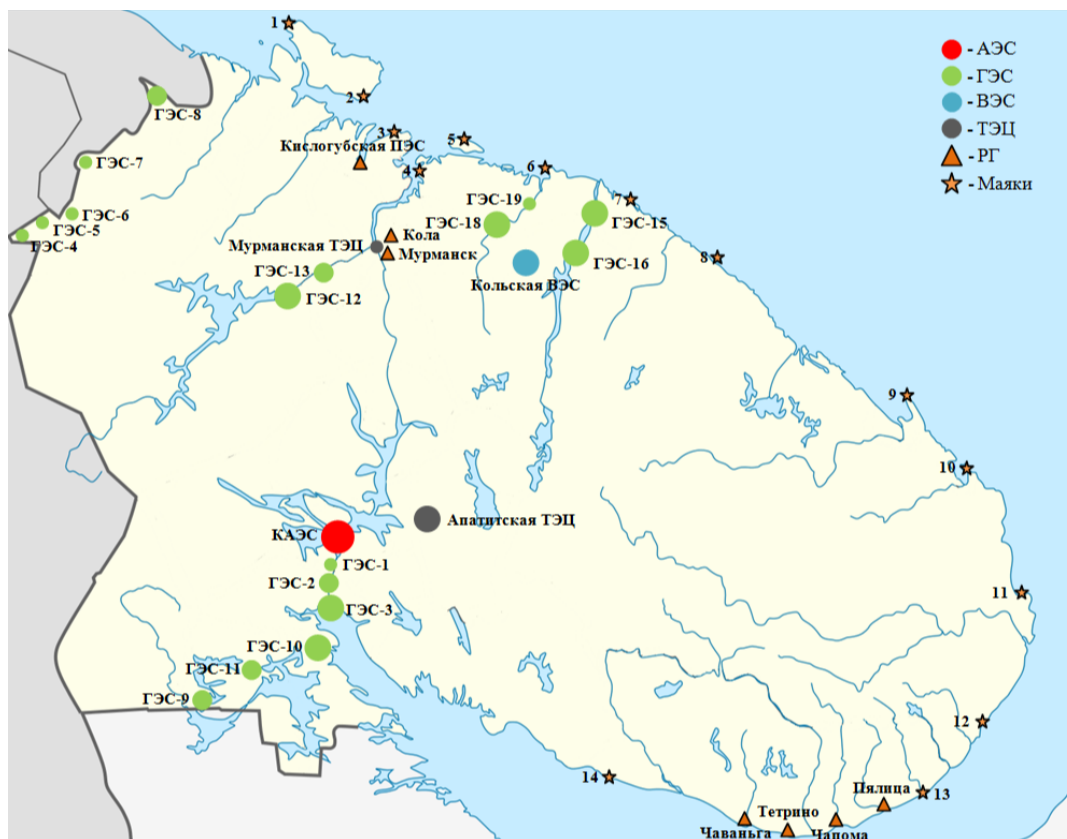


Рис. 5. Энергосистема Мурманской области, включая источники распределенной генерации  
Fig. 5. The power system of the Murmansk region, including sources of distributed generation

## Заключение

Децентрализованные районы Мурманской области сталкиваются с трудностями в обеспечении потребителей электроэнергией из-за удаленности от основных электрических сетей. Дизельные электростанции имеют ряд недостатков: высокая себестоимость вырабатываемой электроэнергии, загрязнение окружающей среды и зависимость от поставок топлива. Использование ВИЭ может стать эффективным решением для устойчивого и экологически чистого электроснабжения в этих регионах. Совместное использование ВИЭ и дизельных генераторов позволит решить эту проблему, обеспечив надежное электроснабжение в периоды, когда ВИЭ не смогут закрыть полностью потребность в электроэнергии. ВИЭ будут использоваться для снижения нагрузки на дизельные установки, экономии топлива и повышения экологической безопасности. Таким образом, внедрение ВИЭ позволяет улучшить качество электроснабжения в децентрализованных районах Мурманской области, сделав его более надежным, доступным и экологичным. Совместное использование ВИЭ и дизельных электростанций является ключом к достижению этой цели и обеспечению устойчивого и долгосрочного развития региона.

## Список источников

1. Минин В. А., Лазарева М. А. Кольская энергосистема: этапы становления, современное состояние и перспективы развития // Электрические станции. 2023. № 11 (1108). С. 22–28. doi:10.34831/EP.2023.1108.11.003. EDN: LZGSMO.
2. Минин В. А. Потенциал и перспективы использования возобновляемых источников энергии Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 21–31. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.002. EDN: BMPLEX.
3. Минин В. А., Целищева М. А. Ресурсы ветра западного сектора Арктической зоны Российской Федерации и возможные направления их использования // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 1. С. 72–84. doi:10.25283/2223-4594-2023-1-72-84. EDN: VXMSXX.
4. Минин В. А. ВИЭ Мурманской области и их использование // Энергия: экономика, техника, экология. 2011. № 5. С. 16–23. EDN: NUKFKL.
5. Кузнецов Н. М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2020. 92 с.

## References

1. Minin V. A., Lazareva M. A. Kol'skaya energosistema: etapy stanovleniya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Kola energy system: stages of formation, current state and prospects of development]. *Elektricheskie stantsii* [Power Plants], 2023, No. 11 (1108), pp. 22–28. (In Russ.). doi:10.34831/EP.2023.1108.11.003. EDN: LZGSMO.
2. Minin V. A. Potentsial i perspektivy ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii Murmanskoy oblasti [Potential and prospects for the use of renewable energy sources in the Murmansk region]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, Vol. 13, No. 3, pp. 21–31. (In Russ.). doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.002. EDN: BMPLEX.
3. Minin V. A., Tselishcheva M. A. Resursy vetra zapadnogo sektora Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i vozmozhnye napravleniya ikh ispol'zovaniya [Wind resources of the western sector of the Arctic zone of the Russian Federation and possible directions of their use]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: ecology and economy], 2023, Vol. 13, No. 1, pp. 72–84. (In Russ.). doi:10.25283/2223-4594-2023-1-72-84. EDN: VXMSXX.

4. Minin V. A. VIE Murmanskoy oblasti i ikh ispol'zovanie [Renewable energy sources of the Murmansk region and their use]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* [Energy: Economy, Technology, Ecology], 2011, No. 5, pp. 16–23. (In Russ.). EDN: NUKFKL.
5. Kuznetsov N. M. *Upravlenie energoeffektivnost'yu v regionakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii* [Energy efficiency management in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2020, 92 p. (In Russ.).

***Информация об авторе***

**М. А. Лазарева** — инженер.

***Information about the author***

**M. A. Lazareva** — Engineer.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.  
The article was submitted 13.05.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.

Научная статья  
УДК 621.316  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.004

## **РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ: ТАНДЕМ ДЛЯ УСТОЙЧИВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ БУДУЩЕГО**

**Никита Игоревич Лазарев**

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

### **Аннотация**

В статье показаны преимущества распределенной генерации и управления спросом как ключевые технологии распределенной энергетики. Объединение этих подходов рассматривается как эффективный инструмент для оптимизации использования ресурсов, снижения затрат, повышения надежности и обеспечения гибкости электроэнергетической системы, особенно для удаленных территорий. Примеры реализации распределенной энергетики в Мурманской области демонстрируют преимущества децентрализованного энергоснабжения.

### **Ключевые слова:**

распределенная генерация, управление спросом, энергоэффективность, виртуальная электростанция

### **Благодарности:**

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

Original article

## **DISTRIBUTED GENERATION AND DEMAND RESPONSE: A TANDEM FOR A SUSTAINABLE ENERGY OF THE FUTURE**

**Nikita I. Lazarev**

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

### **Abstract**

The article discusses the advantages of distributed generation and demand response as key technologies for distributed energy sector. The combination of these approaches is considered as an effective tool to optimize the use of resources, reduce costs, improve reliability and ensure flexibility of the power system, especially for remote areas. Examples of distributed energy implementation in the Murmansk region demonstrate the advantages of decentralized energy supply.

### **Keywords:**

distributed generation, demand response, energy efficiency, virtual power plant

### **Acknowledgments:**

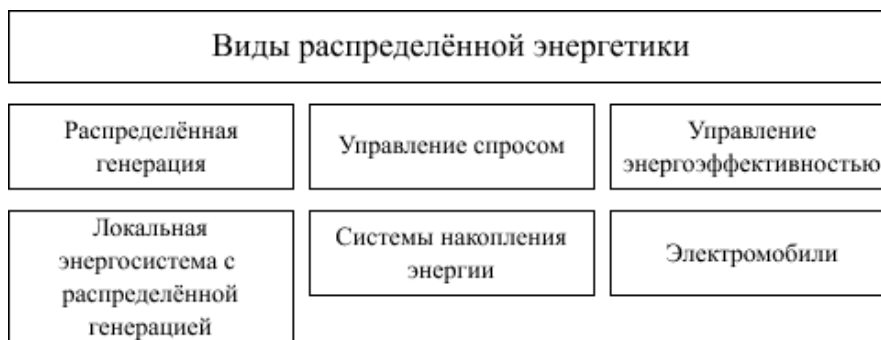
The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### **Введение**

Централизованная энергетическая система России сегодня не обеспечивает потребности развития отдаленных территорий. Распределенная энергетика является ключевым направлением в переходе от традиционных энергосистем к новым технологиям гибкого построения и интеллектуального управления энергетическими сетями. Этот подход основан на использовании распределенной генерации, управлении спросом и энергоэффективностью, систем накопления энергии. Базовое свойство этих технологий — близость к потребителю энергии (рис. 1).

Развитие распределенной энергетики в Мурманской области приведет к переходу от монополярной традиционной системы к диверсификации электроснабжения, теплоснабжения, разнообразию типов и форм взаимодействия энергообъектов большой и малой распределенной энергетики. Перспектива развития распределенной энергетики будет наиболее заметна в отдаленных районах, где невозможно

использовать централизованные системы. За счет внедрения различных технологий распределенной энергетики с использованием возобновляемых источников энергии можно закрыть значительную часть потребности в электроэнергии. Мурманская область обладает значительным потенциалом для развития возобновляемых источников энергии [1].



**Рис. 1.** Виды распределенной энергетики  
**Fig. 1.** Types of distributed energy sector

### Распределенная генерация

Производство электроэнергии в основном зависит от централизованных генерирующих мощностей. Централизованные генерирующие установки расположены в удаленных от потребителей местах, передача электроэнергии вызывает ее потери, снижает ее качество и надежность. Для преодоления этих проблем в энергетике используют технологию распределенной генерации. Ее внедрение позволит наиболее гибко использовать региональную ресурсную базу, а также повысить энергоэффективность, снизить выбросы парниковых газов и затраты на развитие сетевого комплекса и крупной генерации. Это способствует сдерживанию роста цен на электроэнергию, расширению потребительского выбора, повышению инвестиционной привлекательности энергетики, созданию новых рабочих мест.

В целом распределенная генерация способна повысить эффективность электроэнергетического сектора, тем не менее добавление значительного количества объектов распределенной генерации может серьезно снизить надежность сети, хотя различные подходы к стратегии децентрализации и управлению созданной сетью могут смягчить негативные последствия [2]. По мере децентрализации сетей распределенная генерация может быть использована для регулирования реактивной мощности во всей распределительной системе, что обеспечит устойчивую и экономичную работу энергосистемы [3]. Для эффективного применения технологий распределенной генерации следует изучить варианты возможных интегрированных систем, сочетающие несколько технологий малой энергетики в составе единого генерирующего комплекса, находящегося под единым управлением.

В настоящее время невозможно полностью отказаться от мощных электростанций и перейти к децентрализации производства электроэнергии как по экономическим причинам, так и из-за сложности управления многими объектами и их технического обслуживания и необходимости поддержания постоянного баланса генерации и потребления.

Энергосистема Мурманской области является уникальной по своей структуре: в ее составе работают 17 гидроэлектростанций, общая установленная мощность которых составляет 1617 МВт, 2 тепловые электростанции — 250 МВт, Кольская атомная электростанция — 1760 МВт и Кольская ветряная электростанция — 201 МВт [4].

Несмотря на хорошо развитую систему электроснабжения в Мурманской области можно выделить несколько десятков удаленных населенных пунктов, которые находятся в зоне децентрализованного электроснабжения. Обеспечение их надежной и качественной электроэнергией остается одной из ключевых задач. Опыт использования распределенной энергетики в Мурманской области представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Источники распределенной генерации в Мурманской области  
**Fig. 2.** Sources of distributed generation in the Murmansk region

### Управление спросом

Управление спросом розничных потребителей электроэнергии служит важным инструментом для обеспечения гибкости электроэнергетической системы, обеспечивая поддержание и регулирование баланса спроса и предложения электроэнергии. С точки зрения поддержания и регулирования электропотребления интерес вызывают потребители, способные без значительных затрат оптимизировать график своего электропотребления в интересах энергосистемы.

Для реализации технологии управления спросом в России были внесены изменения в нормативно-правовые акты, касающиеся деятельности агрегаторов управления спросом на электроэнергию. Также происходит улучшение механизмов ценозависимого снижения потребления электроэнергии и оказания услуг по обеспечению системной надежности. Такие изменения позволят преобразовать архитектуру электроэнергетики и соответствующую нормативно-правовую базу [5].

Управление спросом можно рассмотреть как дополнение к распределенной генерации. Сочетание распределенной генерации и управления спросом является эффективным инструментом для повышения эффективности и надежности электроэнергетических систем, позволяет оптимизировать использование ресурсов, снизить затраты, повысить надежность и создать более устойчивую энергетическую систему.

Таким образом, совместно рассматриваемые распределенная генерация и система управления спросом могут быть представлены в качестве «виртуальной» электростанции [6], которая интегрирует решения по управлению спросом и предложением распределенной генерации,

обеспечивает эффективное управление спросом на электроэнергию и позволяет оптимизировать графики нагрузок потребителей. Объединение генерирующих мощностей и потребителей помогает сгладить пиковые нагрузки и снизить цену на электроэнергию [7].

Инструмент управления спросом подходит для оказания энергосистеме широкого спектра услуг (рис. 3). Управление спросом стоит в ряду с традиционной и возобновляемой генерацией, способно с хорошим качеством оказывать услуги по регулированию, стабилизации и восстановлению частоты [3].

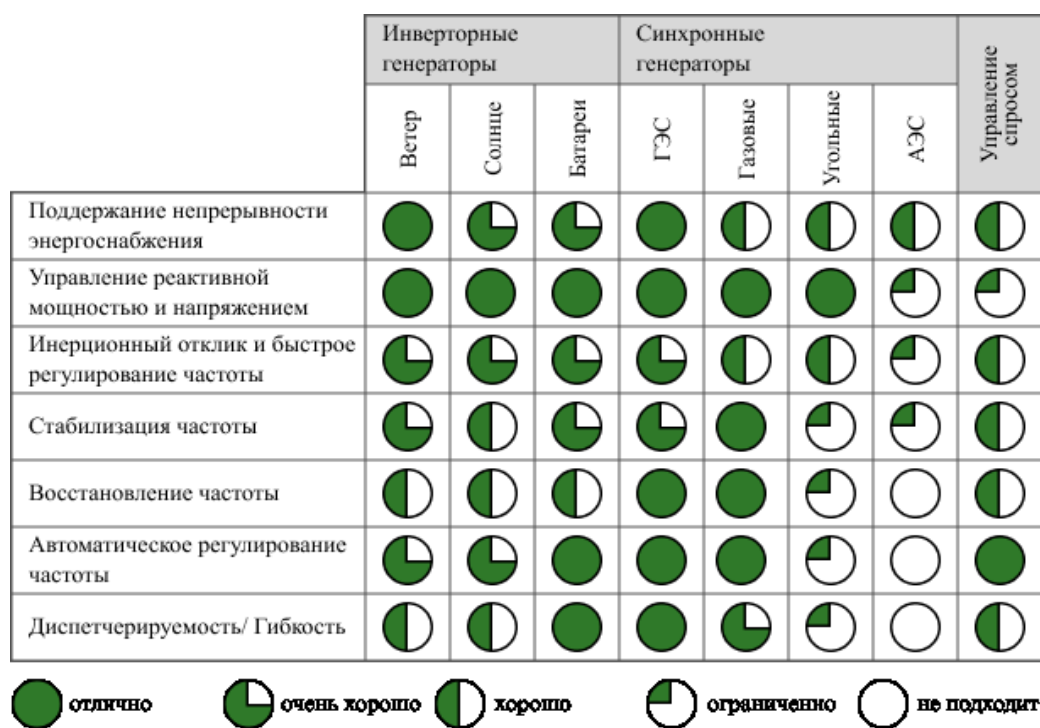


Рис. 3. Системные услуги для участников энергетического рынка  
 Fig. 3. System services for energy market participants

С 2019 г. в Мурманской области для развития инструмента управления спросом потребления электроэнергии внедряется проект, задачей которого является отработка методик и алгоритмов управления спросом промышленных потребителей электроэнергии. Успешным примером является практика управления спросом на Ковдорском горно-обогатительном комбинате, где мощность снижалась на 8 МВт в течение 2 часов в период с февраля по апрель 2022 г. Еще одним примером является заключение свободного договора купли-продажи электроэнергии, вырабатываемой гидроэлектростанциями между ПАО «ТГК-1» и горно-обогатительным комбинатом АО «Апатит». Горно-обогатительные предприятия могут эффективно регулировать электропотребление, изменяя технологические параметры, влияющие на расход электроэнергии [8].

### Заключение

Распределенная энергетика является ключевым направлением в энергетическом переходе, обеспечивает гибкое построение и интеллектуальное управление энергетических сетей. Мурманская область обладает значительным потенциалом распределенной энергетики, в частности возобновляемыми источниками энергии.

Распределенная генерация может обеспечить надежное и качественное электроснабжение в области. Перспектива ее развития будет наиболее заметна в отдаленных районах, где невозможно использовать централизованное электроснабжение. Управление спросом розничных потребителей

электроэнергии играет важную роль в обеспечении гибкости электроэнергетической системы, подходит для оказания широкого спектра услуг по регулированию и восстановлению частоты и обеспечения системной гибкости энергосистемы.

Управление спросом можно рассматривать как дополнение к распределенной генерации. Объединение этих двух подходов является эффективным инструментом для повышения эффективности и надежности электроэнергетических систем. Это оптимизирует использование ресурсов, снижает затраты, повышает надежность и делает энергетическую систему более устойчивой.

#### Список источников

1. Кузнецов Н. М., Коновалова О. Е. Развитие распределенной энергетики в Мурманской области // *Фундаментальные исследования*. 2021. № 5. С. 122–127. doi:10.17513/fr.43049. EDN: YCTFGP.
2. Veldhuis A. J., Leach M., Yang A. The impact of increased decentralised generation on the reliability of an existing electricity network // *Applied Energy*. 2018. Vol. 215. P. 479–502. doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.009.
3. Milligan M. Sources of grid reliability services // *The Electricity Journal*. 2018. Vol. 31, Is. 9. P. 1–7. doi.org/10.1016/j.tej.2018.10.002.
4. Минин В. А., Лазарева М. А. Кольская энергосистема: этапы становления, современное состояние и перспективы развития // *Электрические станции*. 2023. № 11 (1108). С. 22–28. doi:10.34831/EP.2023.1108.11.003. EDN: LZGSMO.
5. Кузнецов Н. М., Маслобоев В. А., Коновалова О. Е. Распределенная энергетика регионов Арктической зоны Российской Федерации // *Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения*. 2021. № 1 (5). С. 11–21. doi:10.51823/74670\_2021\_1\_11. EDN: OCHFWR.
6. Ханаев В. В. Управление спросом на электроэнергию как дополнение к распределенной генерации // *Энергетическая политика*. 2020. № 4 (146). С. 38–51. doi:10.46920/2409-5516\_2020\_4146\_38. EDN: UPJDGJ.
7. Воропай Н. И., Стенников В. А. Централизованная и распределенная генерация — не альтернатива, а интеграция // *Инновационная электроэнергетика — 21*. М.: ИЦ «Энергия», 2017. С. 272–290.
8. Лазарев Н. И., Кузнецов Н. М. Внедрение технологии управления спросом в Мурманской области // *Наука и инновации в Арктике: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Мурманск: Изд-во МАУ, 2024. С. 273–275.

#### References

1. Kuznetsov N. M., Konovalova O. E. Razvitie raspredelyonnoy energetiki v Murmanskoy oblasti [Development of distributed energy sector in the Murmansk region]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2021, No. 5, pp. 122–127. (In Russ.). doi:10.17513/fr.43049. EDN: YCTFGP.
2. Veldhuis A. J., Leach M., Yang A. The impact of increased decentralised generation on the reliability of an existing electricity network. *Applied Energy*, 2018, Vol. 215, pp. 479–502. doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.009.
3. Milligan M. Sources of grid reliability services. *The Electricity Journal*, 2018, Vol. 31, Is. 9, pp. 1–7. doi.org/10.1016/j.tej.2018.10.002.
4. Minin V. A., Lazareva M. A. Kol'skaya energosistema: etapy stanovleniya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Kola energy system: stages of formation, current state and prospects of development]. *Elektricheskie stantsii* [Power Plants], 2023, No. 11 (1108), pp. 22–28. (In Russ.). doi:10.34831/EP.2023.1108.11.003. EDN: LZGSMO.
5. Kuznetsov N. M., Masloboev V. A., Konovalova O. E. Raspredelyonnaya energetika regionov Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii [Distributed energy sector of the regions of the Arctic zone of the Russian Federation]. *Arktika 2035: aktual'nye voprosy, problemy, resheniya* [Arctic 2035: Current Issues, Problems, Solutions], 2021, No. 1 (5), pp. 11–21. (In Russ.). doi:10.51823/74670\_2021\_1\_11. EDN: OCHFWR.



6. Khanaev V. V. Upravlenie sprosom na elektroenergiyu kak dopolnenie k raspredelyonnoy generatsii [Electricity demand management as an addition to distributed generation]. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy], 2020, No. 4 (146), pp. 38–51. (In Russ.). doi:10.46920/2409-5516\_2020\_4146\_38. EDN: UPJDGJ.
7. Voropay N. I., Stennikov V. A. Tsentralizovannaya i raspredelyonnaya generatsiya — ne al'ternativa, a integratsiya [Centralized and distributed generation — not an alternative, but integration]. *Innovatsionnaya elektroenergetika — 21* [Innovative Power Engineering — 21]. Moscow, Publ. center “Energiya”, 2017, pp. 272–290. (In Russ.).
8. Lazarev N. I., Kuznetsov N. M. Vnedrenie tekhnologii upravleniya sprosom v Murmanskoy oblasti [Implementation of demand-side management technology in the Murmansk region]. *Nauka i innovatsii v Arktike: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Science and innovation in the Arctic: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Murmansk, Publ. MAU, 2024. pp. 273–275. (In Russ.).

#### ***Информация об авторе***

**Н. И. Лазарев** — инженер.

#### ***Information about the author***

**N. I. Lazarev** — Engineer.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.  
The article was submitted 13.05.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.

Научная статья  
УДК 621.311  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.005

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КОЛЬСКОЙ ВЭС

**Вера Васильевна Ярошевич<sup>1</sup>, Алексей Сергеевич Карпов<sup>2</sup>, Елизавета Игоревна Губская<sup>3</sup>**

*<sup>1, 2, 3</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия*

*<sup>1</sup>v.yaroshevich@ksc.ru*

*<sup>2</sup>a.karpov@ksc.ru*

*<sup>3</sup>e.gubskaya@ksc.ru*

### Аннотация

Объект исследования в данной статье — электрическая сеть Кольской ВЭС, которая является самым крупным действующим ветропарком за полярным кругом. Приведено описание нового объекта и результаты точечных регистраций показателей качества электроэнергии на подстанции, имеющей гальваническую связь с Кольской энергосистемой. Также выполнен упрощенный аналитический обзор наиболее уязвимых с точки зрения электромагнитной совместимости мест для рассматриваемого участка энергосистемы.

### Ключевые слова:

подстанция, электрическая сеть, ветроэлектростанция, показатели качества электроэнергии, электромагнитная совместимость

### Благодарности:

работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-20051 «Разработка технических решений для эффективного электроснабжения потребителей Арктической зоны РФ»).

Original article

## STUDY OF ELECTRIC POWER PARAMETERS OF THE KOLA WIND FARM

**Vera V. Yaroshevich<sup>1</sup>, Aleksei S. Karpov<sup>2</sup>, Elizaveta I. Gubskaya<sup>3</sup>**

*<sup>1, 2, 3</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia*

*<sup>1</sup>v.yaroshevich@ksc.ru*

*<sup>2</sup>a.karpov@ksc.ru*

*<sup>3</sup>e.gubskaya@ksc.ru*

### Abstract

The research object is the electrical network of the Kola Wind Farm that is the largest one operating above the Arctic Circle. The article describes this new facility and shows the results of power quality indices point recordings carried out at the substation which has galvanic connection with the Kola grid. A simplified analytical review of locations that are the most vulnerable for the considered section of the power system in terms of electromagnetic compatibility is also performed.

### Keywords:

substation, electrical network, wind farm, power quality indices, electromagnetic compatibility

### Acknowledgments:

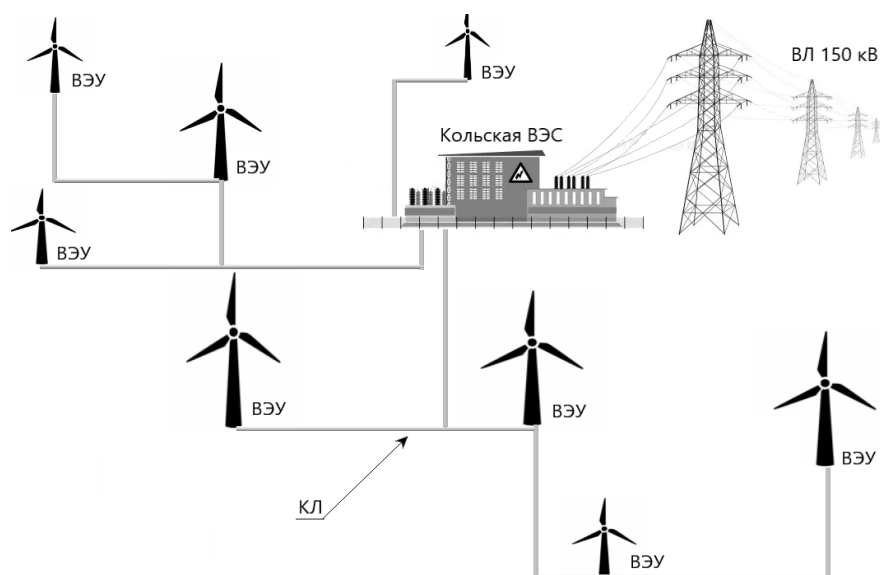
This work was supported by the Russian Science Foundation (project № 24-29-20051 “Development of technical solutions for efficient power supply to consumers of the Arctic zone of the Russian Federation”).

Развитие Арктики является приоритетным на сегодняшний момент направлением для многих мировых держав, при этом удаленные потребители Арктики (как промышленные, так и муниципальные) нуждаются в стабильном энергоснабжении. Для этих целей в 2023 г. был сооружен крупнейший за полярным кругом ветропарк «Кольская ВЭС». Строительством ветропарка занималась итальянская компания «Энел», имевшая до конца 2023 г. представительство в России — ПАО «Энел Россия». Площадкой для строительства было выбрано место в 80 км от города Мурманска в сторону поселка Териберка и каскада Серебрянских ГЭС на основе исследований и обосновывающих расчетов ЦЭС КНЦ РАН, произведенных в 1990-х гг.

Ветрогенераторы, точнее целые парки генераторов, становятся незаменимыми в условиях Арктики, и характерным примером этого является Кольская ВЭС, ветропарк которой оснащен 57 турбинами, его площадь 257 гектаров, а общая установленная мощность после запуска 2-й очереди достигла 202 МВт.

В ходе реорганизации текущим владельцем Кольской ВЭС является ПАО «ЭЛ5-Энерго», в составе которой находятся 3 ГРЭС (Конаковская, Среднеуральская и Невинномысская), а также ВЭС в Ростовской области, при этом основным держателем акций является Группа «Лукойл».

Оборудование ветропарка «Кольская ВЭС» является основным потребителем подстанции ПС 150/35 кВ, которая подключена к энергосистеме Мурманской области (Мурманского филиала ПАО «Россети Северо-Запад») через ПС «Мурманская». Все ветроустановки (ВЭУ) ветропарка объединены в 7 коллекторов (КЛ), в каждом от 7 до 9 ВЭУ, посредством подземных кабельных линий 35 кВ они собираются на подстанции. Далее мощность передается на главный трансформатор подстанции, где напряжение повышается до 150 кВ и далее по воздушной линии передается на подстанцию в Мурманске (рис. 1). Длина линии около 70 км. При помощи Кола-Карельского транзита мощность может перетекать из Мурманской области в Карельскую энергосистему и через нее в общую энергосистему страны. Одним из важных преимуществ новой ВЭС по сравнению с традиционными источниками электроэнергии является динамичность системы при общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ). Для ВЭС этот показатель составляет 100 % за 10 секунд (по данным АО «Системный оператор единой энергетической системы»). Данный показатель диверсифицирует генерирующие возможности Кольской энергосистемы и позволяет более гибко производить автоматическое управление электроэнергетическим режимом.



**Рис. 1.** Схематичное электроснабжение ветропарка  
**Fig. 1.** Schematic diagram of the wind farm power supply

Для подключения новых объектов энергетики (Кольская ВЭС) к Единой системе электроснабжения необходимо, чтобы показатели качества электрической энергии (ПКЭ) новых объектов соответствовали нормам стандарта ГОСТ 32144-2013 [1–5]. Практики использования подобных ВЭУ в тундре Заполярья и анализа электрических характеристик их работы ранее не существовало ни в России, ни в мире, что является уникальным опытом для электроэнергетики Крайнего Севера. С целью проверки соответствия значений ПКЭ установленным требованиям [2] на подстанции «Кольская ВЭС» и была разработана методика синхронизированной одновременной регистрации значений ПКЭ и произведены замеры четырьмя сертифицированными приборами.

Для контроля ПКЭ использовались сертифицированные анализаторы качества электрической энергии Metrel типа MI 2893. Прибор Metrel MI 2893 Power Master XT является анализатором класса А по ГОСТ 30804.4.30 [3], что позволяет использовать его для сертификации электрической энергии в соответствии с ГОСТ 32144 [1].

Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1]; ГОСТ 30804.4.30-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии» [3]; ГОСТ 33073-2014 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг» [2].

Измерения выполнялись во вторичных цепях измерительных трансформаторов напряжения и тока и не требовали снятия напряжения с токоведущих частей оборудования. Подключение оборудования для проверки соответствия ПКЭ требованиям, установленным ГОСТ 32144-2013, производилось на 1-й и 2-й секциях шин 35 кВ в релейных шкафах ЗРУ-35 кВ соответственно. Для более детального изучения электрических характеристик в сети 35 кВ были установлены два дополнительных регистратора качества электроэнергии на две секции шин в ячейке «5ВЭУ» и ячейке «НТ2». К ячейке «5ВЭУ» подключен коллектор, состоящий из семи ВЭУ, а к ячейке «НТ2» подключен нейтралеобразующий трансформатор. На основании проведенных экспериментов получены протоколы регистраций показателей качества электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013.

Места подключения приборов указаны в табл. 1, а фото с места проведения измерений приведены на рис. 2.

Таблица 1

Места подключения приборов на подстанции «Кольская ВЭС»  
Points of the instruments connection to the Kola Wind Farm substation

№ прибора	Место установки	Время усреднения, с	Время записи, дни
1	2 сш	10	7
2	1 сш	10	7
3	5ВЭУ	3	2
4	НТ2	3	2



Рис. 2. Регистрация ПКЭ на ПС «Кольская ВЭС»  
Fig. 2. Power quality indices recording at the Kola Wind Farm substation

Анализ протоколов измерений показал наличие искажений только на вводе 2-й системы шин РУ 35 кВ подстанции «Кольская ВЭС». Обобщенные данные из протоколов измерений на вводах 1-й и 2-й систем шин сведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что на 2-й системе шин такой показатель качества электроэнергии, как коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, не соответствует норме ГОСТ 32144-2013 [1], в данном случае искажена 18-я гармоника, а все остальные параметры находятся в допустимых пределах. График искаженной 18-й гармоники представлен на рис. 3. Для наглядности на рис. 4 представлены графики изменения 18-й гармоники на 1 сш, которая, согласно протоколу, считается нормальной, то есть соответствующей стандарту.

На рисунках 3 и 4 показаны изменения 18-й гармоники по трем фазам за все время регистраций на 1 и 2 сш подстанции, а также нормативные значения  $K_{U(18)(95\%)} = 0,2$  (синяя граница) и  $K_{U(18)(100\%)} = 0,3$  (красная граница). Как видно из рисунков, превышения нормативов зафиксированы на обеих системах шин, но из-за усреднения в 10 минут (ГОСТ 32144-2013 [1]) эти значения не вошли в протоколы либо значительно занижены (см. табл. 2). Так, например, максимальное значение 18-й гармоники на фазе В 2 сш  $K_{U(18)}$  равно 0,74, а в протоколе 0,41 (см. табл. 2).

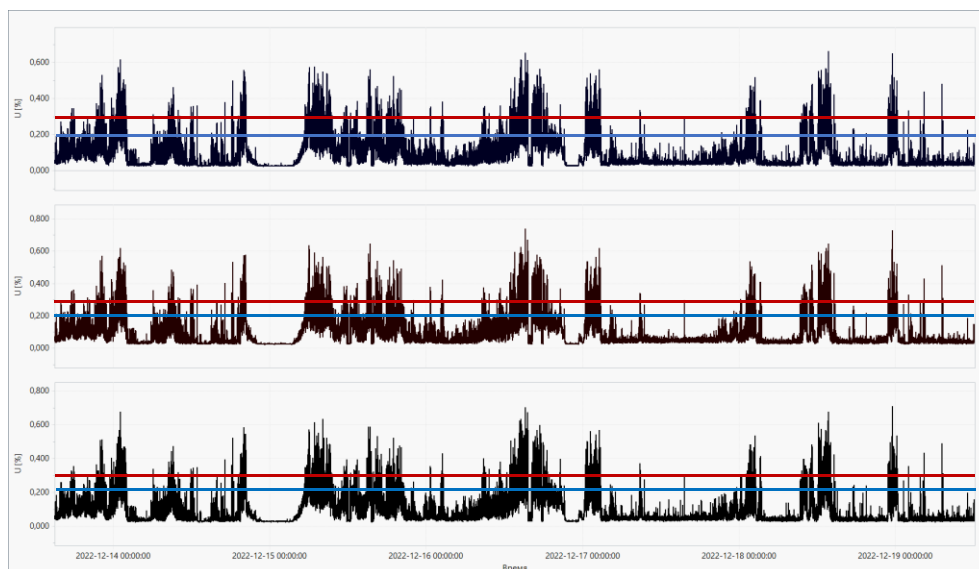
Изменения 18-й гармоники на присоединениях ко 2 сш (5ВЭУ и НТ2) приведены на рис. 5.

Зарегистрированы искажения 18-й гармоники (см. рис. 5), которые превышают предельное значение  $K_{U(18)} = 0,3$  (красная граница) по двум фазам. Искажения зафиксированы в обоих присоединениях, но из-за усреднения в протокол эти значения не попали.

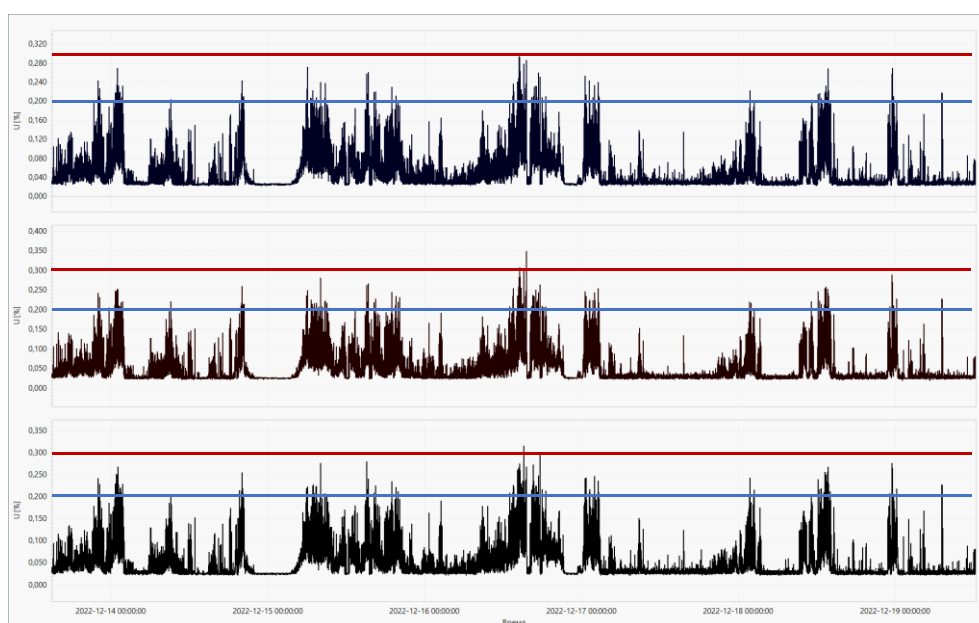
Таблица 2

Показатели качества электрической энергии на ПС «Кольская ВЭС»  
 Power quality indices recorded at the Kola Wind Farm substation

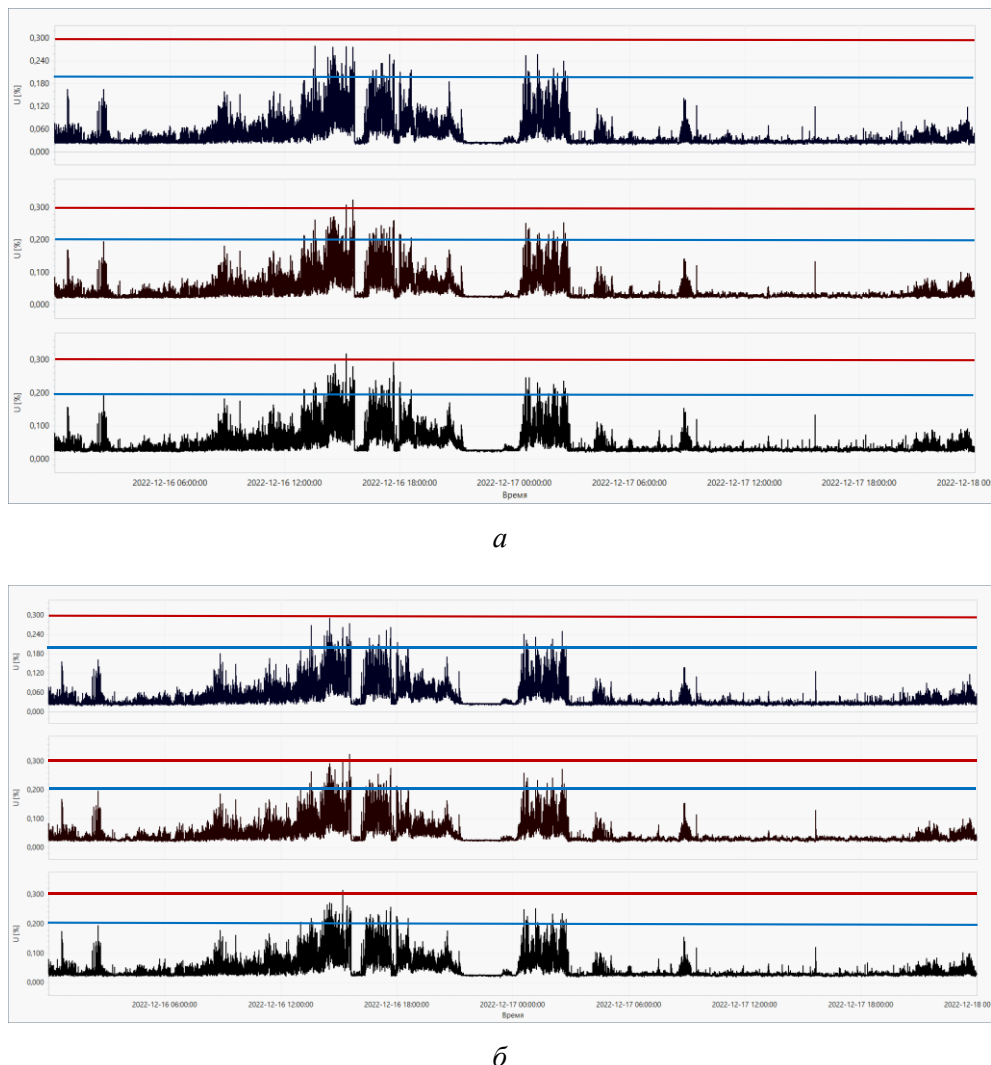
Показатель	Место измерения	Время измерений	Измеренные значения			Норма
			А	В	С	
$\delta U, \%$	1 сш	100	<b>-1,80÷1,86</b>	<b>-1,82÷1,62</b>	<b>-2,01÷1,77</b>	$\pm 10$
	2 сш	100	<b>-1,94÷1,59</b>	<b>-1,94÷1,42</b>	<b>-2,15÷1,48</b>	$\pm 10$
$K_U, \%$	1 сш	95	<b>0,86</b>	<b>1,00</b>	<b>0,9</b>	5,0
		100	<b>1,52</b>	<b>1,57</b>	<b>1,39</b>	8,0
	2 сш	95	<b>0,74</b>	<b>0,87</b>	<b>0,73</b>	5,0
		100	<b>1,22</b>	<b>1,39</b>	<b>1,16</b>	8,0
$K_{U(18)}, \%$	1 сш	95	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	0,20
		100	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	0,30
	2 сш	95	<b>0,18</b>	<b>0,19</b>	<b>0,18</b>	0,20
		100	<b>0,38</b>	<b>0,41</b>	<b>0,40</b>	0,30
$P_{ST}, \text{о. е}$	1 сш	100	1,24	0,47	0,84	1,38
	2 сш	100	1,25	0,48	0,84	1,38
$P_{LT}, \text{о. е}$	1 сш	100	0,54	0,23	0,37	1,0
	2 сш	100	0,55	0,23	0,38	1,0
$\Delta f, \text{Гц}$	1 сш	95	<b>-0,03÷0,03</b>			$\pm 0,2$
		100	<b>-0,06÷0,06</b>			$\pm 0,4$
	2 сш	95	<b>-0,03÷0,03</b>			$\pm 0,2$
		100	<b>-0,06÷0,06</b>			$\pm 0,4$
$K_{2U}, \%$	1 сш	95	<b>0,22</b>			2
		100	<b>0,42</b>			4
	2 сш	95	<b>0,23</b>			2
		100	<b>0,42</b>			4
$K_{0U}, \%$	1 сш	95	<b>0,2</b>			2
		100	<b>0,2</b>			4
	2 сш	95	<b>0,3</b>			2
		100	<b>0,4</b>			4



**Рис. 3.** Изменения 18-й гармоники на 2 сш ПС «Кольская ВЭС»  
**Fig. 3.** 18th harmonic variation at the 2<sup>nd</sup> bus of the Kola Wind Farm substation



**Рис. 4.** Изменения 18-й гармоники на 1 сш ПС «Кольская ВЭС»  
**Fig. 4.** 18th harmonic variation at the 1<sup>st</sup> bus of the Kola Wind Farm substation

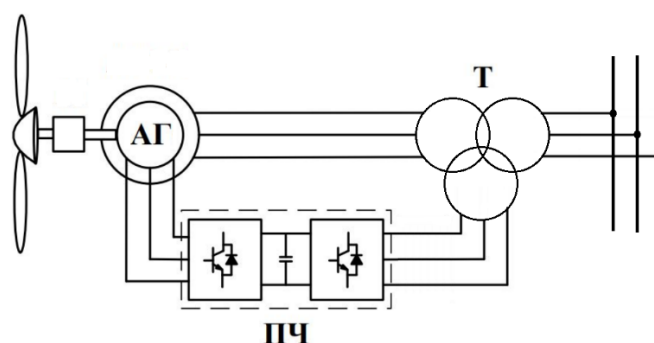


**Рис. 5.** Изменения 18-й гармоники на присоединениях 2 сш ПС «Кольская ВЭС»:  
*a* — 5ВЭУ; *б* — НТ2  
**Fig. 5.** 18th harmonic variation at the 2<sup>nd</sup> bus connections of the Kola Wind Farm substation:  
*a* — 5WT; *б* — NT2

Наличие четных гармоник, превышающих нормативные значения, может свидетельствовать о наличии в сети источника их появления. В случае постоянно присутствующего фактора, генерирующего гармоники, их воздействие может обуславливать различные негативные последствия, одним из которых является сопутствующий нагрев, выводящий из строя изоляцию двигателей, обмоток трансформаторов, снижающий сопротивление конденсаторов и т. д. При нагревании фазного провода или других токопроводящих элементов в диэлектриках возникают необратимые процессы, снижающие их изоляционные свойства.

Одним из источников гармоник в сети ветропарка являются силовые трансформаторы. Обычно трансформаторы излучают небольшую долю нечетных гармоник (до 20-го порядка) за счет намагничивающего тока, однако переход в режим насыщения, например при перенапряжении, способствует увеличению доли гармонических составляющих, регистрируемых в точке общего присоединения [6; 7].

Кроме того, в качестве источника гармонических искажений могут выступать непосредственно ветроэнергетические установки (ВЭУ). Главным образом это связано с применением в ветроэнергетике технологий, основанных на использовании устройств силовой электроники [8–12]. Ветропарк «Кольская ВЭС» включает 57 ВЭУ типа SG 3.4-132 компании Siemens-Gamesa [13], конструкция которых также предусматривает наличие силовых преобразователей. Установки данного типа оснащены асинхронным генератором с фазным ротором АГ, статор которого подключается к электрической сети через трансформатор Т, как показано на рис. 6. Преобразователь частоты ПЧ, посредством которого осуществляется соединение ротора с тем же трансформатором Т, предназначен для компенсации разницы между механической и электрической частотами за счет подачи на ротор тока с переменной частотой. Это обеспечивает получение стабильных напряжений и частоты на выходе генератора в широком диапазоне изменения частоты вращения ротора [14].



**Рис. 6.** Схема ВЭУ с генератором двойного питания:  
АГ — асинхронный генератор; Т — трансформатор; ПЧ — преобразователь частоты  
**Fig. 6.** Diagram of wind turbine using a doubly-fed induction generator:  
АГ — asynchronous generator; Т — transformer; ПЧ — frequency converter

Наиболее широко применяемые силовые преобразователи генерируют характерный спектр гармонических токов, который включает нечетные гармоники 5-го, 7-го, 11-го, 13-го и т. д. порядков. Преобразователь может выдавать в сеть четные гармоники, однако это возможно в том случае, когда его регулирование неправильно настроено, в результате чего возникает асимметрия срабатывания электронных ключей [15].

Важным фактором повышения уровня гармонического искажения в сети ветропарка является гармонический резонанс. Явление резонанса особенно характерно для ветропарков, оборудованных конденсаторными батареями. Тем не менее длинные подземные кабели, по которым электроэнергия от каждой ВЭУ передается в сеть, также могут приводить к резонансу, причем на более высоких частотах. Это обусловлено тем, что кабельные линии обладают значительной шунтирующей емкостью и в сочетании с их индуктивностью и индуктивностью трансформатора образуют резонансный контур для источника высших гармоник. Если резонансная частота соответствует характерной гармонической частоте данной системы, это приводит к усилению гармонических искажений напряжения и/или тока, генерируемого ветропарком [16; 17].

В случае постоянно присутствующего фактора, генерирующего гармоники, их воздействие может обуславливать различные негативные последствия в электрической сети, из которых особо следует выделить:

- сопутствующий нагрев, выводящий из строя изоляцию двигателей, обмоток трансформаторов, снижающий сопротивление конденсаторов и т. д. При нагревании фазного провода или других токопроводящих элементов в диэлектриках возникают необратимые процессы, снижающие их изоляционные свойства;



- ложное срабатывание в распределительных сетях — приводит к отключению автоматов, высоковольтных выключателей и прочих устройств, реагирующих на изменение режима, обусловленное гармониками;

- появление асимметрии в промышленных сетях с трехфазными источниками при возникновении гармоники на одной фазе, от чего может нарушаться нормальная работа трехфазных выпрямителей, силовых трансформаторов, трехфазных ИБП и прочего оборудования;

- возникновение шума в сетях связи, влияние на смежные слаботочные и силовые кабели за счет наведенной ЭДС. На величину гармоники ЭДС влияет как расстояние между проводниками, так и продолжительность их приближения;

- преждевременное электрическое старение оборудования. За счет разрушения чувствительных элементов высокоточные приборы утрачивают класс точности и подвергаются преждевременному изнашиванию;

- дополнительные финансовые расходы, обуславливаемые потерями от индуктивных нагрузок, остановкой производства, внеочередными ремонтами и преждевременной поломкой.

### **Заключение**

В качестве генерирующего объекта Кольская ВЭС успешно интегрирована в энергосистему Мурманской области. Принципиально новый вид генерации открывает для региона более широкие возможности как по выдаваемой мощности «зеленой» электроэнергии, так и по возможностям регулирования этой мощности. На основе данного источника энергии возможно развитие удаленных промышленных объектов, вырабатывающих продукцию с низким углеродным следом.

Проведенные исследования показателей качества электроэнергии на подстанции «Кольская ВЭС» не выявили существенных отклонений. Однако в протоколах присутствует несоответствие по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, что требует дополнительных мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости высоковольтных установок.

Анализ регистраций также выявил наличие существенных краткосрочных отклонений, которые из-за усреднений «сглаживаются». Данные процессы не являются критическими и не описываются приведенными в статье нормативными стандартами, однако являются определенным маркером событий, требующих дополнительного исследования и устранения, поскольку напрямую влияют как на стабильность работы всего участка данной системы, так и на долговечность и работоспособность элементов сети.

Также анализ выявил (не попавшее в протоколы) отклонение значений четных гармоник, превышающее нормативные значения. Для определения природы его формирования и мероприятий по устранению необходимы дополнительные специализированные исследования.

### **Список источников**

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
2. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.
3. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.
4. ГОСТ 30804.4.7-2013 (ИЕС 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2013. 40 с.

5. ГОСТ IEC/TR 61000-3-7-2020 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3–7. Нормы. Оценка норм электромагнитной эмиссии для подключения установок, создающих колебания напряжения, к системам электроснабжения среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. Введ. 01.01.2021. М.: Стандартинформ, 2020. 58 с.
6. Kocewiak Ł. H., Hjerrild J., Bak C. L. Harmonic models of a back-to-back converter in large offshore wind farms compared with measurement data // Proceedings of Nordic Wind Power Conference. Rønne, Denmark, 2009. P. 1–7.
7. Yang K. Wind Turbine Harmonic Emissions and Propagation through A Wind Farm: Thesis for the degree of Licentiate of Engineering. Skellefteå, 2012. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991380/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
8. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Chichester: Wiley, 2005. 692 p.
9. Норматов Н. Н. и др. Влияние возобновляемых источников энергии на энергосистему // Сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий». Уфа, 2020. С. 119–124.
10. Bollen M., Hassan F. Integration of Distributed Generation in the Power System. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. 528 p.
11. Кармазин А. А. Обзор основных типов промышленных ветроэлектрических установок // Альтернативная энергетика и экология. 2013. Т. 121, № 3. С. 90–95.
12. Chandram K., Soujanya K. Detection and Quantification of Harmonic Emissions in Doubly Fed Induction Generator // Int. J. Electr. Eng. Technol. 2017. Vol. 8, № 5. P. 20–31.
13. Kola (Russia) — Wind farms — Online access // The Wind Power. URL: [https://www.thewindpower.net/windfarm\\_en\\_10778\\_kola.php](https://www.thewindpower.net/windfarm_en_10778_kola.php) (дата обращения: 30.10.2023).
14. Безруких П. П., Безруких (мл.) П. П., Грибков С. В. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / под общей редакцией П. П. Безруких. М.: Интехэнергоиздат, Теплоэнергетик, 2014. 304 с.
15. Rice D. E. A Detailed Analysis of Six-Pulse Converter Harmonic Currents // IEEE Trans. Ind. Appl. 1994. Vol. 30, No. 2. P. 294–304.
16. Bollen M., Yang K. Harmonic aspects of wind power integration // J. Mod. Power Syst. Clean Energy. 2013. Vol. 1, No. 1. P. 14–21.
17. Zheng R., Bollen M. Harmonic Resonances Associated with Wind Farms. Skellefteå: Luleå University of Technology, 2010. 56 p.

## References

1. GOST 32144-2013. *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014, 20 p.
2. GOST 33073-2014. *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Kontrol' i monitoring kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Control and monitoring of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2015, 46 p.
3. GOST 30804.4.30-2013. *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Metody izmerenij pokazatelej kachestva jelektricheskoy jenerгии* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of power quality indices]. Moscow, Standartinform, 2014, 60 p.
4. GOST 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). *Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Obshhee rukovodstvo po sredstvam izmerenij i izmerenijam garmonik i intergarmonik dlja sistem jelektrosnabzhenija i podkljuhaemyh k nim tehniceskikh sredstv* [General guide to measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical means connected to these]. Moscow, Standartinform, 2013, 40 p.

5. GOST IEC/TR 61000-3-7-2020 *Jelektromagnitnaja sovmestimost' (JeMS). Chast' 3-7. Normy. Ocenka norm jelektromagnitnoj jemissii dlja podkljuchenija ustanovok, sozdajushhij kolebanija naprjazhenija, k sistemam jelektrosnabzhenija srednego, vysokogo i sverhvyssokogo naprjazhenija* [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3–7. Limits. Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems]. Moscow, Standartinform, 2020, 58 p.
6. Kocewiak Ł. H., Hjerrild J., Bak C. L. Harmonic models of a back-to-back converter in large offshore wind farms compared with measurement data. *Proceedings of Nordic Wind Power Conference*, Rønne, 2009, pp. 1–7.
7. Yang K. Wind Turbine Harmonic Emissions and Propagation through A Wind Farm: Thesis for the degree of Licentiate of Engineering. Skellefteå, 2012. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991380/FULLTEXT01.pdf> (accessed 30.10.2023).
8. Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*. Chichester, England, Wiley, 2005, 692 p.
9. Normamatov N. N., Shanazarov A. Je., Ajtbaev N. A., Rahmonov M. T. Vlijanie vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии na jenergosistemu [Renewable energy impact on the grid]. *Sbornik nauchnyh trudov V Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Jelektroprivod, jelektrotehnologii i jelektrooborudovanie predpriyatij"* [Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference "Electric drive, electrical technologies and electrical equipment of enterprises"]. Ufa, 2020, pp. 119–124. (In Russ.).
10. Bollen M., Hassan F. *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Hoboken, NJ, Wiley, 2011, 528 p.
11. Karmazin A. A. Obzor osnovnyh tipov promyshlennyh vetrojelektricheskijh ustanovok [A review of the main types of industrial wind turbines]. *Alt'ernativnaja jenergetika i jekologija* [Alternative Energy and Ecology], 2013, Vol. 121, No. 3, pp. 90–95. (In Russ.).
12. Chandram K., Soujanya K. Detection and Quantification of Harmonic Emissions in Doubly Fed Induction Generator. *International Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017, Vol. 8, No. 5, pp. 20–31.
13. Kola (Russia) — Wind farms — Online access — The Wind Power. Available at: [https://www.thewindpower.net/windfarm\\_en\\_10778\\_kola.php](https://www.thewindpower.net/windfarm_en_10778_kola.php) (accessed 30.10.2023).
14. Bezrukih P. P., Bezrukih (ml.) P. P., Gribov S. V. *Vetrojenergetika: Spravochno-metodicheskoe izdanie* [Wind power engineering: Reference and methodological edition]. Moscow, Intehjenergoizdat, Teplojenergetik, 2014, 304 p.
15. Rice D. E. A Detailed Analysis of Six-Pulse Converter Harmonic Currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, Vol. 30, No. 2, pp. 294–304.
16. Bollen M., Yang K. Harmonic aspects of wind power integration. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 14–21.
17. Zheng R., Bollen M. *Harmonic Resonances Associated with Wind Farms*. Skellefteå, Luleå University of Technology, 2010, 56 p.

#### **Информация об авторах**

**В. В. Ярошевич** — научный сотрудник;

**А. С. Карпов** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

**Е. И. Губская** — инженер.

#### **Information about the authors**

**V. V. Yaroshevich** — Research Associate;

**A. S. Karpov** — PhD (Engineering), Senior Research Associate;

**E. I. Gubskaya** — Engineer.

Статья поступила в редакцию 27.04.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 17.05.2024.

The article was submitted 27.04.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 17.05.2024.

Научная статья  
УДК 621.31  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.006

## КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ ДУГОВЫЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ

**Елизавета Игоревна Губская<sup>1</sup>, Виталий Валентинович Колобов<sup>2</sup>,  
Алексей Сергеевич Карпов<sup>3</sup>, Вера Васильевна Ярошевич<sup>4</sup>**

<sup>1–4</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>*e.gubskaya@ksc.ru*

<sup>2</sup>*v.kolobov@ksc.ru*

<sup>3</sup>*a.karpov@ksc.ru*

<sup>4</sup>*v.yaroshevich@ksc.ru*

### Аннотация

Дуговые сталеплавильные печи являются мощным источником возмущений, ухудшающих качество электроэнергии в питающих сетях. Нагрузка электропечи носит нелинейный резкопеременный характер, что приводит к значительным колебаниям напряжения и, следовательно, к возникновению фликера. Для того чтобы стабилизировать напряжение сети, эффективной и достаточной мерой является компенсация реактивной мощности. В статье представлен краткий обзор и анализ эффективности наиболее широко применяемых компенсирующих устройств. Приведена модель в среде ATP/EMTP, имитирующая работу устройства компенсации реактивной мощности ДСП на участке действующей электросети одного из предприятий тяжелой промышленности.

### Ключевые слова:

дуговая сталеплавильная печь, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, фликер, компенсация реактивной мощности, ATP/EMTP

### Благодарности:

работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-20051 «Разработка технических решений для эффективного электроснабжения потребителей Арктической зоны РФ»).

Original article

## REACTIVE POWER COMPENSATION IN POWER SYSTEMS SUPPLYING ELECTRIC ARC FURNACES

**Elizaveta I. Gubskaya<sup>1</sup>, Vitalii V. Kolobov<sup>2</sup>, Aleksei S. Karpov<sup>3</sup>, Vera V. Yaroshevich<sup>4</sup>**

<sup>1–4</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

<sup>1</sup>*e.gubskaya@ksc.ru*

<sup>2</sup>*v.kolobov@ksc.ru*

<sup>3</sup>*a.karpov@ksc.ru*

<sup>4</sup>*v.yaroshevich@ksc.ru*

### Abstract

Electric arc furnaces are powerful source of disturbances that deteriorates power quality in power systems. The electric furnace load is of nonlinear and drastically variable character, which leads to significant voltage fluctuations and, consequently, flicker. To stabilize AC voltage, reactive power compensation is an effective and sufficient measure. The article presents a brief review of the most widely used compensating devices and analyses efficiency of these. An ATP/EMTP model simulating the operation of EAF reactive power compensation device in real power system of one facility of heavy industry is presented.

### Keywords:

electric arc furnace, electromagnetic compatibility, power quality, flicker, reactive power compensation, ATP/EMTP

### Acknowledgments:

This work was supported by the Russian Science Foundation (project № 24-29-20051 “Development of technical solutions for efficient power supply to consumers of the Arctic zone of the Russian Federation”).

## Введение

Дуговые электрические печи используются для плавления металлов за счет тепловой энергии электрической дуги. Благодаря ряду технических и экономических преимуществ относительно других агрегатов электропечи нашли широкое применение в производстве сталей. Однако, ввиду нелинейного и резкопеременного характера нагрузки, дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются мощным источником искажений качества электроэнергии и тем самым оказывают негативное воздействие на других потребителей, подключенных к той же системе электроснабжения.

В технической литературе [1–7] одной из основных причин несоответствия качества электроэнергии в сетях, питающих ДСП, установленным нормам указан фликер. Согласно действующему в РФ стандарту [8] фликер определяется как ощущение неустойчивости зрительного восприятия, вызванное световым источником, яркость или спектральный состав которого изменяются во времени. Возникновение этого возмущения обусловлено колебаниями напряжения сети (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночными быстрыми его изменениями. К воздействию фликера наиболее чувствительны осветительные приборы, электрические вращающиеся машины, устройства на основе силовой электроники, а также электротермические и другие установки. Более того, высокий уровень фликера влияет отрицательным образом не только на другое электрооборудование, но и непосредственно на работу ДСП. Это связано с тем, что эффективность технологического процесса плавки, вследствие нелинейности вольт-амперной характеристики электрической дуги, напрямую зависит от поддержания стабильного напряжения электросети.

Для сглаживания колебаний напряжения и фликера, а следовательно, для стабилизации напряжения сети, как правило, применяют устройства компенсации реактивной мощности.

В данной статье основное внимание уделяется обзору наиболее широко распространенных компенсирующих устройств. Также в работе приведена модель в среде АТР/ЕМТР, имитирующая работу компенсатора реактивной мощности ДСП на участке действующей электросети одного из предприятий тяжелой промышленности, на основе которой в дальнейшем планируется разработка алгоритма управления «умным» компенсирующим устройством.

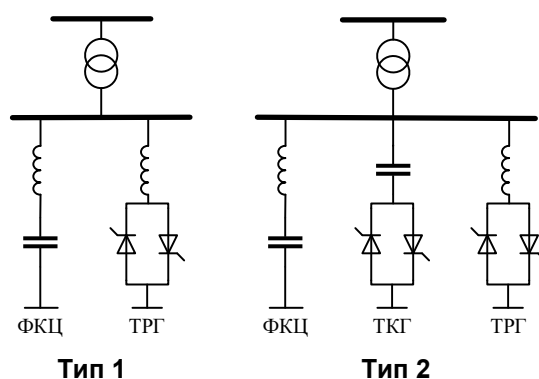
## Способы компенсации реактивной мощности ДСП

В настоящее время на практике наиболее часто встречается использование следующих устройств компенсации реактивной мощности.

Установка *блока статических конденсаторов*, собранных по схеме «треугольник» или «звезда», является наименее эффективным способом снижения дозы фликера, поскольку данное устройство значительно повышает напряжение сети в моменты погасания электрической дуги и даже может увеличивать его до значений, превышающих допустимые пределы. Кроме того, в некоторых случаях наличие блока конденсаторов в сети может привести к возникновению резонанса на определенных частотах и, как следствие, к возрастанию колебаний напряжения [9].

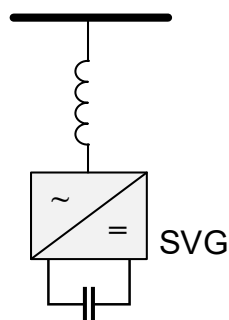
*Статический тиристорный компенсатор* (static VAR compensator, сокр. SVC) включает основные элементы двух типов: тиристорно-реакторные группы (ТРК) и тиристорно-конденсаторные группы (ТКГ), а также фильтро-компенсирующие цепи (ФКЦ), которые предназначены в основном для подавления гармоник низкого порядка, генерируемых самим компенсатором [10]. Исполнение схемы SVC встречается в двух видах, как показано на рис. 1.

Тиристорный компенсатор позволяет поддерживать высокий коэффициент мощности, независимо от колебаний реактивной мощности, вызванных работой ДСП, а также подавлять высшие гармоники, генерируемые в сеть печью. Использование данной установки является наименее дорогостоящим из возможно допустимых способов компенсации. Однако необходимо отметить, что SVC позволяет снизить кратковременную дозу фликера максимум в 2–2,5 раза [11]. Достижение более высоких показателей ограничено временными задержками, которые составляют до 100 мс [12] (в зависимости от производителя), и динамическим взаимодействием ФКЦ в составе SVC с электрической сетью.



**Рис. 1.** Схема статического тиристорного компенсатора  
**Fig. 1.** SVC schematic diagram

*Статический генератор* (static VAR generator, сокр. SVG) реактивной мощности, или *статический синхронный компенсатор* (static synchronous compensator, сокр. STATCOM), конструктивно состоит из тонкопленочных конденсаторов постоянного тока, управляемого инвертора напряжения на базе IGBT транзисторов и реактора или трансформатора, через который устройство подключается к сети, как показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема статического генератора реактивной мощности  
**Fig. 2.** SVG schematic diagram

SVG формирует выходное напряжение по принципу многоуровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ): фазное напряжение генератора образовано суммарным выходным напряжением всех силовых ячеек. От SVC статический генератор реактивной мощности отличается, во-первых, меньшим на порядок временем отклика на изменения контролируемого параметра, которое составляет не более 5 мс [13]; во-вторых, возможностью снизить кратковременную дозу фликера минимум в 4 раза [14]. Дополнительным достоинством SVG является компактность конструкции за счет отсутствия высокоомощных конденсаторов.

Сравнительный анализ применения технологий SVC и SVG для компенсации реактивной мощности дуговых электропечей приведен в исследованиях [14–18]. Авторы выражают единое мнение, что SVG наиболее эффективно решает проблему колебаний питающего напряжения и фликера. Это обосновано следующими выводами.

1. За счет существенно сокращенных временных задержек SVG значительно лучше снижает уровень фликера относительно SVC той же мощности. При этом эффект сглаживания возмущения может быть усилен путем увеличения мощности устройства, что невозможно в случае с тиристорным компенсатором.

2. При низком напряжении сети SVG также обеспечивает сглаживание фликера лучше, чем SVC, так как с уменьшением напряжения реактивная мощность, генерируемая SVG, сокращается линейно, в то время как реактивная мощность на выходе SVC, пропорциональная квадрату величины напряжения, стремительно падает, что нарушает стабильность напряжения электросети.

3. Другими преимуществами статического генератора являются более плавное регулирование реактивной мощности и значительно меньшая генерация высших гармоник в сеть.

Недостатком SVG по отношению к SVC следует указать более высокую стоимость устройства.

### Компенсация реактивной мощности на участке действующей сети 10 кВ

В 2023 г. сотрудниками ЦЭС КНЦ РАН посредством сертифицированных анализаторов Metrel типа MI 2893 (класс А по ГОСТ [19]) была произведена регистрация показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в сети 10 кВ предприятия тяжелой промышленности, на площадке которого функционируют несколько маломощных ДСП.

Упрощенная схема электропитания одной из установок представлена на рис. 3. ДСП подключается к сети посредством электропечного понижающего трансформатора ЭПТ со ступенчатым регулированием низшего напряжения, типовая мощность которого составляет 12500 кВА. Подключение трансформатора к сборным шинам распределительного устройства осуществляется через разъединитель РД и автоматический вакуумный выключатель ВВ с трансформаторами тока ТТ.

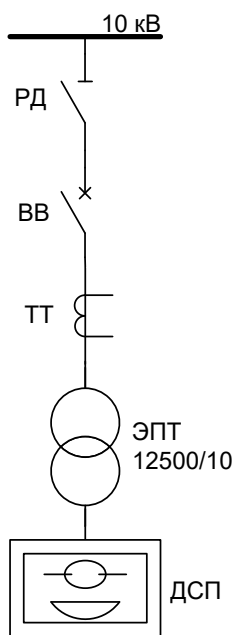
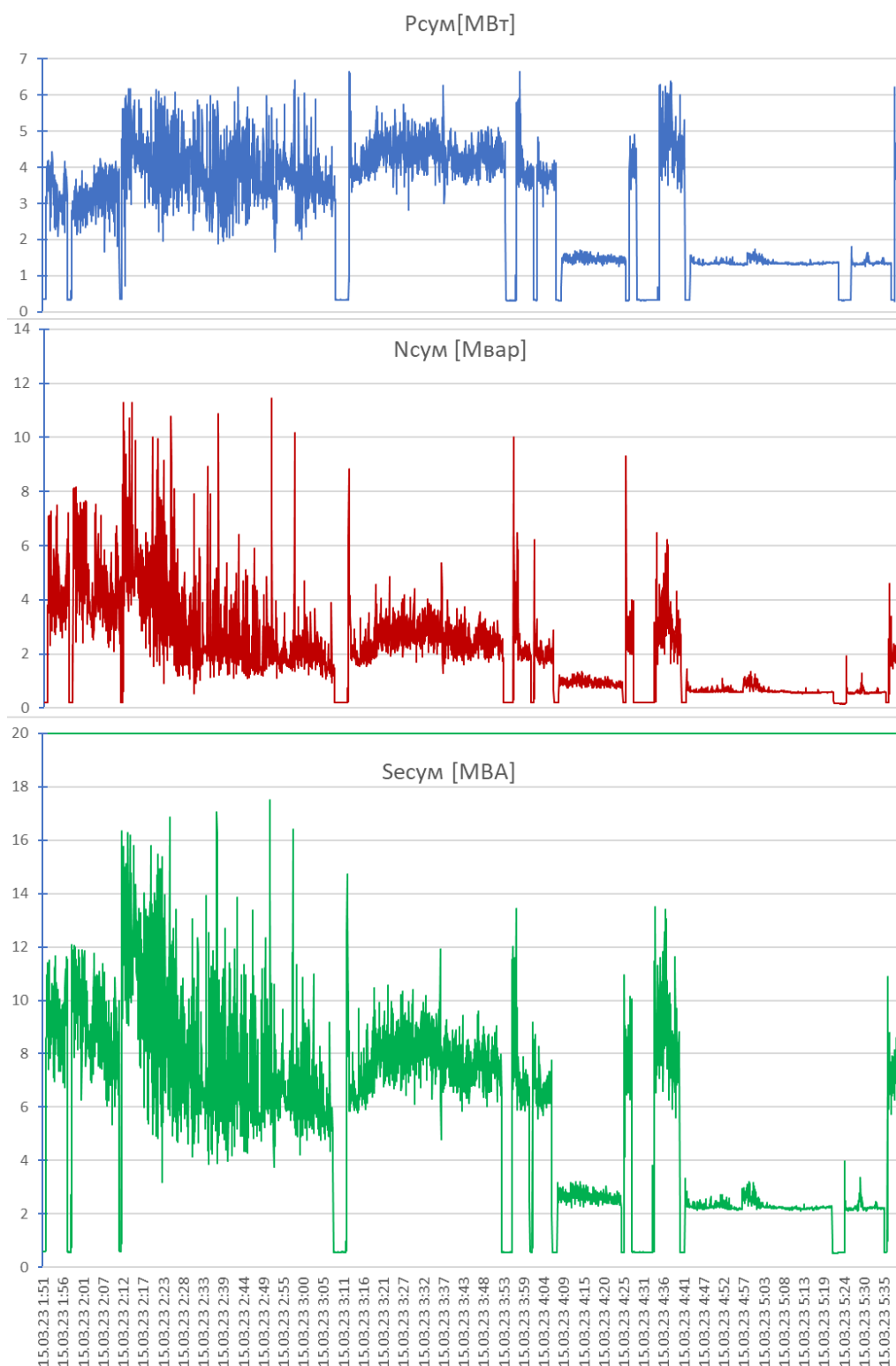


Рис. 3. Упрощенная схема электроснабжения ДСП  
Fig. 3. Simplified diagram of the EAF power supply

В результате проведенных измерений получены графики мощности (активной  $P_{\text{сум}}$ , МВт; реактивной  $N_{\text{сум}}$ , Мвар и полной  $S_{\text{сум}}$ , МВА), потребляемой ДСП, которые приведены на рис. 4. Символьные обозначения мощностей соответствуют стандарту [20].

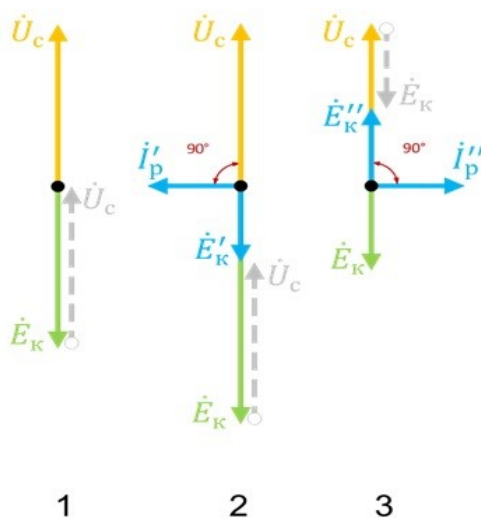
Как можно видеть, нагрузка электропечи изменяется скачкообразно в широком диапазоне. При этом на секции шин РУ 10 кВ, обеспечивающей электроснабжение ДСП, зафиксировано превышение кратковременной и длительной доз фликера установленных норм примерно в 7 и 3 раза соответственно.



**Рис. 4.** Графики мощности, потребляемой ДСП  
**Рис. 4.** Plot of the EAF power consumption



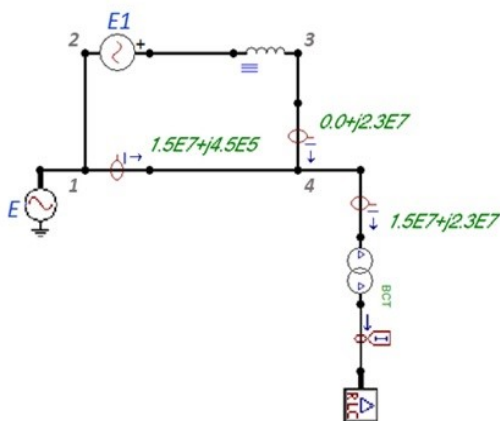
В качестве возможного решения данной проблемы предлагается подключение параллельно с потребителем (ДСП) компенсирующего устройства, работа которого, по сути, аналогична работе синхронного двигателя без нагрузки на валу [21; 22]. Принцип действия данной установки поясняют векторные диаграммы, которые приведены на рис. 5. Компенсация реактивной мощности не производится, если ЭДС компенсатора  $\dot{E}_K$  численно равна напряжению сети  $\dot{U}_c$  (рис. 5, 1). Когда ЭДС устройства достигает значения  $\dot{E}'_K$ , превышающего  $\dot{U}_c$  на величину падения напряжения  $\Delta\dot{E}$  (рис. 5, 2), под действием  $\Delta\dot{E}$  в сети возникает реактивный ток  $\dot{I}'_p$ , который опережает напряжение сети на  $90^\circ$  (емкостной ток). Синхронный компенсатор в этом случае выдает реактивную мощность в сеть. Если же  $\dot{E}''_K < \dot{U}_c$  (рис. 5, 3), генерируется ток  $\dot{I}''_p$ , отстающий от напряжения сети на  $90^\circ$  (индуктивный ток), компенсатор при этом потребляет реактивную мощность.



**Рис. 5.** Векторные диаграммы синхронного компенсатора:  
 1 — компенсация отсутствует; 2 — емкостный режим; 3 — индуктивный режим  
**Fig. 5.** Vector diagrams of a synchronous compensator:  
 1 — standby mode; 2 — capacitive mode; 3 — inductive mode



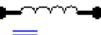

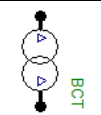

Приведенный принцип компенсации реактивной мощности ДСП демонстрирует модель, выполненная в среде АТР/ЕМТР, как показано на рис. 6.

Использованные для создания модели элементы, а также их назначение сведены в таблице.



**Рис. 6.** Общий вид модели рассматриваемого участка сети 10 кВ в АТР/ЕМТР  
**Fig. 6.** ATP/EMTP model of the 10 kV network under study

### Описание элементов модели The model components description

Элемент	Описание
	Трехфазный источник переменного напряжения
	
	Элемент для моделирования трехфазной цепи, состоящий из трех параллельных индуктивных катушек
	Элемент, измеряющий ток, А
	Модель двухобмоточного трансформатора. Задаются паспортные данные электропечного трансформатора
	Элемент для моделирования трехфазной цепи, состоящий из трех RLC цепей, соединенных по схеме «треугольник». Имитирует нагрузку ДСП

Данная модель отражает конфигурацию исследуемого участка сети, заданные параметры включают реальные паспортные данные электропечного трансформатора.

Модель имитирует работу исследуемого участка электросети в режиме, когда нагрузка печи максимальна (режим горения электрических дуг). При этом на участке 1234, включающем источник ЭДС  $E1$  и индуктивный элемент, формируется чисто реактивный ток, который накладывается на реактивную составляющую тока в сети. Таким образом, компенсатор обеспечивает сглаживание резких колебаний реактивной мощности в сети.

Представленная модель ляжет в основу разработки «умного» компенсирующего устройства, сочетающего как аппаратную, так и программную части, оптимизированные для наиболее эффективной работы в сети, обеспечивающей электропитание ДСП на данном предприятии.

Применение такого устройства позволит поддерживать баланс реактивной мощности в системе электроснабжения и, следовательно, снизить колебания питающего напряжения и уровень фликера.

### Заключение

Вследствие специфического характера нагрузки дуговые сталеплавильные печи вызывают мощные возмущения, искажающие качество электроэнергии в сетях промышленных предприятий. Быстрые и резкие изменения потребляемой ДСП мощности приводят к значительным колебаниям напряжения и возникновению фликера. Для сглаживания этих явлений устанавливают устройства компенсации реактивной мощности, такие как SVC и SVG.

Применение SVC долгое время являлось общепринятым способом компенсации, несмотря на отсутствие во многих случаях возможности удовлетворить в полной мере требования к качеству электроэнергии за счет ряда ограничений, обусловленных особенностью конструкции (наличие тиристорных вентилей, LC-фильтров). Эти технические ограничения были преодолены с развитием IGBT транзисторов, которые легли в основу технологии SVG.

Статический генератор реактивной мощности выгодно отличается от других компенсаторов, в первую очередь, быстродействием, которое является критически важным параметром, так как возмущения, вызванные работой ДСП, носят крайне быстрый и случайный характер. Благодаря этому и другим преимуществам SVG считается значительно более эффективным, хотя и дорогостоящим, компенсирующим устройством.

Установку с таким же принципом действия предлагается использовать на участке действующей сети 10 кВ промышленного предприятия, для которого ЦЭС КНЦ РАН выполнял в 2023 г. ряд договорных работ. Достичь наиболее полного соответствия качества электроэнергии в данной

электросети теоретически возможно с помощью «умного» компенсирующего устройства, которое способно обеспечивать практически мгновенное изменение вырабатываемой реактивной мощности. Для этого необходимо минимизировать временные задержки между обработкой входного сигнала и генерированием выходного, в связи с чем требуется определение оптимальной конфигурации схемы устройства, а также разработка алгоритма для блока управления, что является направлением дальнейшего исследования.

Радикальные пути решения данной проблемы включают замену силового трансформатора на более мощный, а также реорганизацию действующей схемы электроснабжения в целом. Однако существенный недостаток перечисленных мер — высокие финансовые затраты промышленных предприятий.

#### Список источников

1. Ершов А. М. Системы электроснабжения. Часть 2: Электрические нагрузки. Компенсация реактивной мощности: курс лекций. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. 230 с.
2. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электрической энергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
3. Andrei H., Cepisca C., Grigorescu S. Power quality and electrical arc furnaces / ed. Eberhard A. Rijeka: InTech, 2011. 362 с.
4. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling // Energy. 2016. Vol. 115. P. 830–839.
5. Sajeesh D., Seema J. Research on power quality issues in electric arc furnace and its mitigation techniques // Int. J. Eng. Res. Technol. 2014. Vol. 3, No 1. P. 1121–1124.
6. Электромагнитная совместимость потребителей: монография / И. В. Жежеленко [и др.]. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.
7. Reactive compensation for AC electric arc furnace considering power quality constraints / X. Zhu [et al.] // Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. Belo Horizonte, 2016. P. 919–924.
8. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
9. Deaconu S. I., Nicolae P. G., Latinovic T. Comparative study for EAF's reactive energy compensation methods and power factor improvement // WSEAS Trans. Syst. 2010. Vol. 9, No 9. P. 979–988.
10. Eremia M., Liu Ch., Edris A. Static Var Compensator (SVC) // Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence. Hoboken, New Jersey: Wiley & IEEE Press, 2016. Ch. 5. P. 271–338.
11. Static Var Compensator The key to better arc furnace economy // ABB Group. Leading digital technologies for industry. URL: [https://library.e.abb.com/public/6c4608703c0e7760832577bb004fae9/A02-0102\\_E.pdf](https://library.e.abb.com/public/6c4608703c0e7760832577bb004fae9/A02-0102_E.pdf) (дата обращения: 25.04.2024).
12. Статические генераторы реактивной мощности СТАТКОМ // Группа СВЭЛ. URL: <https://svel.ru/catalog/ustroystva-uluchsheniya-kachestva-elektricheskoy-energii/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-statkom/> (дата обращения: 25.04.2024).
13. Статические генераторы реактивной мощности (СТАТКОМ, СГРМ, SVG) // НПП «РУ-ИНЖИНИРИНГ». URL: <https://ru-drive.com/products/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> (дата обращения: 25.04.2024).
14. Static synchronous compensator (STATCOM) for arc furnace and flicker compensation. Report prepared by Working Group B4.19, published by CIGRE as “Technical Brochure No 237” in 2003. 170 p.
15. Zhang Z., Fahmi N. R., Norris W. T. Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey) // 2001 IEEE Porto Power Tech Conference. Porto, 2001. P. 508–513.
16. Schauder C. STATCOM for compensation of large electric arc furnace installations // 1999 IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet. PES 1999 — Conf. Proc. 1999. Vol. 2. P. 1109–1112.
17. Samet H., Jarrahi M. A. A comparison between SVC and STATCOM in flicker mitigation of electric arc furnace using practical recorded data // 30th Power System Conference (PSC). Tehran, 2015.

P. 300–304.

18. Kashani M. G., Babaei S., Bhattacharya S. SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement // 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Rogers, AR, USA, 2013. P. 1–7.
19. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.
20. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. Approved 2 February 2010. IEEE, 2010. 50 p.
21. Кацман М. М. Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 2017. 496 с.
22. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 234 с.

## References

1. Ershov A. M. *Sistemy elektrosnabzheniya. Chast' 2: Elektricheskie nagruzki. Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti* [Electrical power systems. Part 2: Electrical loads. Reactive power compensation]. Chelyabinsk, Publ. centre SUSU, 2018, 230 p. (In Russ.).
2. Zhezhelenko I. V., Saenko Yu. L. *Pokazateli kachestva elektricheskoy energii i ih kontrol' na promyshlennyyh predpriyatiyah* [Power quality indices and control of those at industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat, 2000, 252 p. (In Russ.).
3. Andrei H., Cepisca C., Grigorescu S. *Power quality and electrical arc furnaces*. Rijeka, InTech, 2011, 362 p.
4. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. *Energy*, 2016, Vol. 115, pp. 830–839.
5. Sajeesh D., Seema J. Research on power quality issues in electric arc furnace and its mitigation techniques. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2014, Vol. 3, No. 1, pp. 1121–1124.
6. Zhezhelenko I. V., Shidlovskiy A. K., Pivnyak G. G., Saenko Yu. L., Noyberger N. A. *Elektromagnitnaya sovmestimost' potrebiteley* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow, Mashinostroenie, 2012, 351 p. (In Russ.).
7. Zhu X., Chen H., Hu P., Chen R. Reactive compensation for AC electric arc furnace considering power quality constraints. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*. Belo Horizonte, 2016, pp. 919–924.
8. *GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014, 20 p. (In Russ.).
9. Deaconu S. I., Nicolae P. G., Latinovic T. Comparative study for EAF's reactive energy compensation methods and power factor improvement. *WSEAS Transactions on Systems*, 2010, Vol. 9, No. 9, pp. 979–988.
10. Eremia M., Liu Ch., Edris A. *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*. Hoboken, New Jersey, Wiley & IEEE Press, 2016, ch. 5, pp. 271–338.
11. Static Var Compensator The key to better arc furnace economy. ABB Group. Leading digital technologies for industry. Available at: [https://library.e.abb.com/public/6c4608703c0e7760832577bb004face9/A02-0102\\_E.pdf](https://library.e.abb.com/public/6c4608703c0e7760832577bb004face9/A02-0102_E.pdf) (accessed 25.04.2024).
12. *Sticheskie generatory reaktivnoy moshchnosti STATKOM* [Static VAR generator STATCOM]. *Gruppa SVEL* [SVEL Group]. (In Russ.). Available at: <https://svel.ru/catalog/ustroystva-uluchsheniya-kachestva-elektricheskoy-energii/sticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-statkom/> (accessed

- 25.04.2024).
13. *Statische generatory reaktivnoy moshchnosti (STATKOM, SGRM, SVG)* [Static VAR generator (STATCOM, SVG, SVG)]. *NPP "RU-INZhINIRING"* [NPO "RU-INZhINIRING"]. (In Russ.). Available at: <https://ru-drive.com/products/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> (accessed 25.04.2024).
  14. Static synchronous compensator (STATCOM) for arc furnace and flicker compensation. Report prepared by Working Group B4.19, published by CIGRE as "Technical Brochure No 237" in 2003, 170 p.
  15. Zhang Z., Fahmi N. R., Norris W. T. Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey). *2001 IEEE Porto Power Tech Conference*. Porto, 2001, pp. 508–513.
  16. Schauder C. STATCOM for compensation of large electric arc furnace installations. *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meet, PES 1999, Conference Proceedings*, 1999, Vol. 2, pp. 1109–1112.
  17. Samet H., Jarrahi M. A. A comparison between SVC and STATCOM in flicker mitigation of electric arc furnace using practical recorded data. *30th Power System Conference (PSC)*. Tehran, 2015, pp. 300–304.
  18. Kashani M. G., Babaei S., Bhattacharya S. SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement. *2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. Rogers, AR, USA, 2013, pp. 1–7.
  19. *GOST 30804.4.30-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of power quality indices]. Moscow, Standartinform, 2014, 60 p. (In Russ.).
  20. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE, 2010, 50 p.
  21. Касман М. М. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machines]. Moscow, Publ. centre "Akademiya", 2017, 496 p. (In Russ.).
  22. Kabyshev A. V. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriyatiy* [Reactive power compensation in electrical installations of industrial enterprises]. Tomsk, Publ. Tomsk polytechnic university, 2012, 234 p. (In Russ.).

#### *Информация об авторах*

**Е. И. Губская** — инженер;  
**В. В. Колобов** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;  
**А. С. Карпов** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;  
**В. В. Ярошевич** — научный сотрудник.

#### *Information about the authors*

**E. I. Gubskaya** — Engineer;  
**V. V. Kolobov** — PhD (Engineering), Leading Research Associate;  
**A. S. Karpov** — PhD (Engineering), Senior Research Associate;  
**V. V. Yaroshevich** — Research Associate.

Статья поступила в редакцию 15.05.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.  
The article was submitted 15.05.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.

Научная статья  
УДК 621.317.3  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.007

## **ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТА**

**Евгения Дмитриевна Бороздина**

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

### **Аннотация**

При полевых измерениях электрических параметров грунта на частотах от сотен кГц до нескольких МГц существуют нежелательные электромагнитные эффекты. Эти эффекты вносят значительную ошибку в измеряемое удельное сопротивление грунта. В работе показано, как проявляются высокочастотные эффекты в зависимости от глубины исследования и параметров грунта. Для этого создана расчетная модель с использованием четырехэлектродной установки с перпендикулярным расположением токовых и потенциальных электродов. Расчеты выполнены для различных размеров установки. Рассматривались как однородная, так и многослойные модели грунта. Результаты расчетов сравнивались с рассчитанными аналитическим способом. Показано, что влияние электромагнитных эффектов увеличивается с глубиной исследования и частотой сигнала.

### **Ключевые слова:**

удельное сопротивление грунта, метод конечных разностей во временной области, высокочастотные эффекты

### **Благодарности:**

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

Original article

## **HIGH-FREQUENCY EFFECTS IN FIELD MEASUREMENTS OF FREQUENCY-DEPENDENT SOIL PROPERTIES**

**Evgeniya D. Borozdina**

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

### **Abstract**

Field measurements of the frequency-dependent soil electrical properties at high frequencies (from 100 kHz up to several MHz) can be affected by unwanted electromagnetic effects. These effects can lead to significant errors in soil resistivity measurements. In this work the high-frequency effects are demonstrated. For this, the simulation model was developed based on the finite-difference time-domain method. Soil properties were calculated using the perpendicular dipole-dipole array. Different array dimensions, as well as uniform and multilayered soil models were considered. Simulation results are compared with those calculated analytically. It was shown that the electromagnetic effects increase with the depth of investigation and excitation frequency.

### **Keywords:**

soil resistivity, finite difference time domain (FDTD) method, high-frequency electromagnetic effects

### **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).

### **Введение**

Измерение и моделирование электрических параметров грунта (удельного сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости) в частотном диапазоне, характерном для токов молний, имеют большое значение при изучении электромагнитных переходных процессов в энергосистемах и проектировании систем заземления. Есть много работ, в которых показана необходимость учета частотной зависимости параметров грунта, например, при расчете импульсных характеристик заземлителей [1–3].

Полевые измерения в широком диапазоне частот проводятся для того, чтобы уточнить и подтверждать частотно-зависимые модели грунта. Поэтому важно избегать ошибок при измерениях. Большинство ошибок, по крайней мере на низких частотах, можно избежать, используя подходящий метод измерений, например, как в [4]. Четырехэлектродный метод позволяет избавиться от приэлектродных эффектов (поляризации) и контактного сопротивления, характерного, например, для метода с полусферой [5]. Причем диполи следует располагать перпендикулярно, чтобы обеспечить низкую электромагнитную связь между измерительными цепями [6], что особенно важно, когда измерения проводятся на частотах порядка нескольких МГц.

Для данного метода измерений, впрочем, как и для других известных методов, характерно существование нежелательных электромагнитных эффектов. Эти эффекты носят емкостный и индуктивный характер. Емкостные эффекты подобны тем, что были описаны в лабораторных измерениях в [7]. Паразитная индуктивность возникает из-за самоиндукции электромагнитного поля в приповерхностной области грунта при протекании тока по проводам, соединяющим электроды и источник тока (напряжения), ее величина пропорциональна проводимости грунта, частоте и квадрату длины потенциального провода [8].

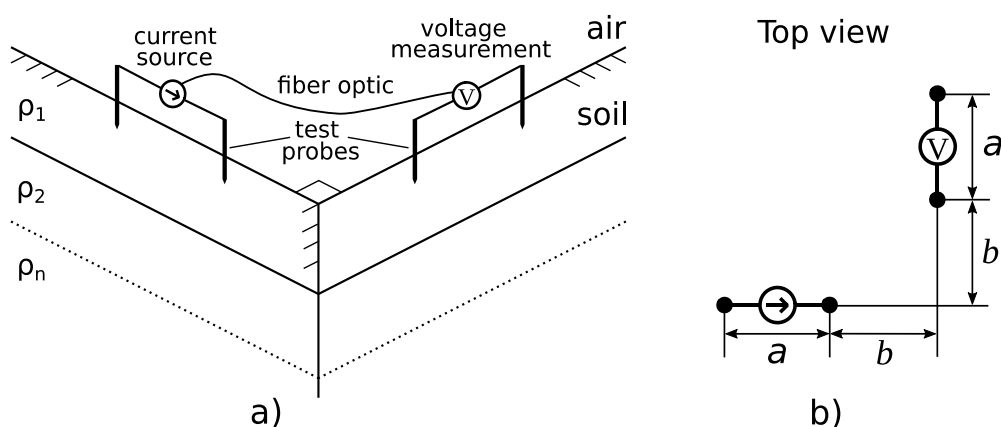
В [3] было показано, что на частотах от 100 кГц и выше электромагнитные эффекты могут вносить существенную ошибку в измеряемое удельное сопротивление грунта. Также было отмечено, что их величина зависит от глубины исследования. Глубина же зависит от геометрических параметров установки.

Цель данной работы заключается в том, чтобы оценить влияние высокочастотных электромагнитных эффектов на результаты измерений в зависимости от глубины исследования в частотном диапазоне от 100 кГц до 4 МГц. Для этого были проведены расчеты для различных расстояний между диполями четырехэлектродной установки на одно-, двух- и трехслойных моделях грунта. Рассматривались только вертикальные неоднородности.

## Методы

Оценить влияние высокочастотных эффектов удобно с помощью расчетных методов, поскольку можно провести множество расчетов для различных параметров установки и грунта, что в полевых условиях было бы затруднительно. Для расчетов использовался метод конечных разностей во временной области (finite difference time domain (FDTD) method) [9].

Типичная установка для полевых измерений частотно-зависимых параметров грунта с перпендикулярным расположением питающих и измерительных электродов приведена на рис. 1, *a*. На рис. 1, *b* изображен вид расчетной модели сверху.



**Рис. 1.** Четырехэлектродный метод с перпендикулярным расположением диполей:  
*a* — типичная установка для полевых измерений; *b* — расчетная модель (вид сверху)

**Fig. 1.** Four electrode method with perpendicular dipole-dipole arrangement:  
*a* — typical field measurement setup; *b* — calculation model (top view)

Диаметр проводников и электродов равен 3 и 8 мм соответственно. Электроды погружены на одну ячейку в грунт. Для обеспечения высокой точности расчетов размер ячейки расчетной сетки в большинстве случаев принимался 0,05 м. В отдельных случаях, когда размер расчетной области сильно увеличивался из-за размера установки или количества слоев грунта, ячейка увеличивалась до 0,125 м, чтобы сократить время расчетов. Проводники располагаются на высоте трех или одной ячейки от поверхности грунта в зависимости от размера ячейки.

Импульс тока моделируется с помощью функции Хейдлера [10]. Для отражения волн от границ расчетной области используются поглощающие граничные условия CPML [9] толщиной 10 ячеек. Время расчетного процесса составляет 400 мкс.

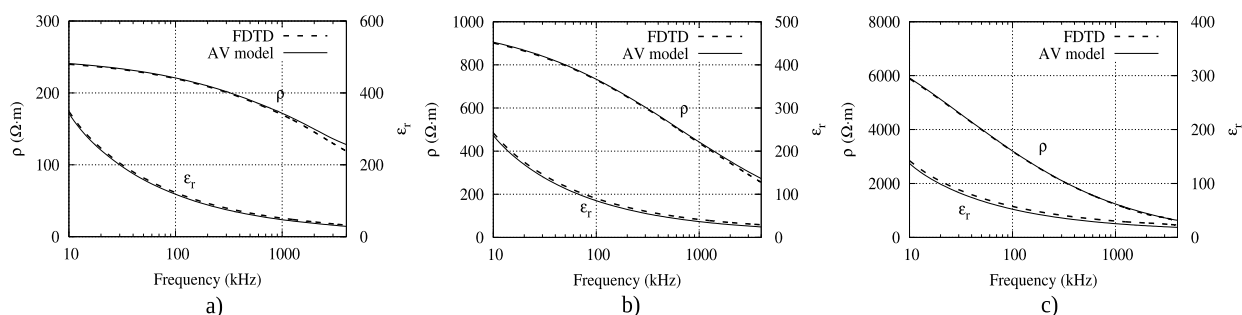
Параметры грунта моделируются с помощью функции Дебая [11]. Для моделирования частотной зависимости в работе используется модель Alipio — Visacro [12]. Для данной модели подбирались параметры функции Дебая, и затем эта функция применялась в FDTD расчетах. Для каждого  $\rho_0$  задается своя функция.  $\rho_0$  — это удельное сопротивление грунта, измеренное на низкой частоте (обычно 100 Гц) или на постоянном токе [13].

Все расчеты в данной работе выполнены с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом [14]. Там же можно найти подробную информацию о том, как задаются параметры модели.

### Оценка влияния высокочастотных эффектов

Чтобы убедиться в корректности FDTD модели, сравним результаты вычислений с заданными изначально по модели Alipio — Visacro (AV).

На рисунке 2 приведены результаты расчетов для установки с размерами  $a = 1$  м и  $b = 1,25$  м (см. рис. 1, *b*). Низкочастотное удельное сопротивление грунта 250, 1000 и 9000 Ом·м.



**Рис. 2.** Результаты расчетов для однородного грунта,  $a = 1$  м,  $b = 1,25$  м:

$a$  —  $\rho_0 = 250$  Ом·м;  $b$  —  $\rho_0 = 1000$  Ом·м;  $c$  —  $\rho_0 = 9000$  Ом·м

**Fig. 2.** Calculation results for the uniform soil models,  $a = 1$  m and  $b = 1.25$  m for all cases:

$a$  —  $\rho_0 = 250$   $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $b$  —  $\rho_0 = 1000$   $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $c$  —  $\rho_0 = 9000$   $\Omega \cdot \text{m}$

Размер ячейки сетки FDTD 0,05 м. Количество членов Дебая равно 7, в дальнейших расчетах оно будет сокращено до 4, чтобы сократить время вычислений (точность вычислений при этом не изменится).

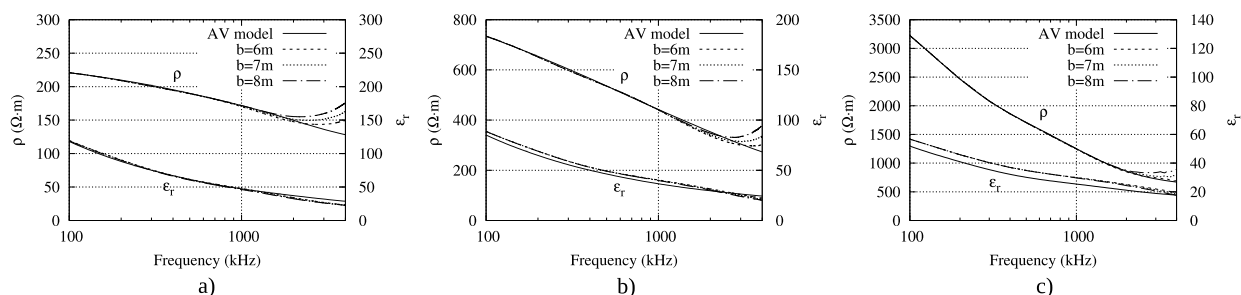
Из графиков видно, что рассчитанные значения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости методом FDTD практически идеально совпадают с заданными изначально во всём диапазоне частот. Высокочастотных эффектов при этом не наблюдается.

Далее, используя эти же параметры грунта, проведем расчеты, увеличивая расстояние между диполями  $b$ , чтобы продемонстрировать высокочастотные эффекты. Длина диполей  $a$  во всех случаях не превышает 1 м, чтобы избежать нежелательных емкостных эффектов между электродами [7].



### Однородный грунт

На рисунке 3 показаны результаты расчетов для трех случаев, когда расстояние между диполями  $b$  равно 6, 7 и 8 м. Размер ячейки FDTD 0,05 м.



**Рис. 3.** Результаты расчетов для однородного грунта,  $a = 1$  м для всех установок:

$a$  —  $\rho_0 = 250 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $b$  —  $\rho_0 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $c$  —  $\rho_0 = 9000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

**Fig. 3.** Calculation results for the uniform soil models,  $a = 1$  m for all arrays:

$a$  —  $\rho_0 = 250 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ;  $b$  —  $\rho_0 = 1000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ;  $c$  —  $\rho_0 = 9000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$

Видно, что результаты расчетов методом FDTD не совпадают с заданными. С частоты порядка 1 МГц электромагнитные эффекты вносят ошибку в удельное сопротивление. Влияние электромагнитных эффектов становится более очевидным с увеличением дистанции между диполями.

Можно отметить, что по мере увеличения удельного сопротивления грунта электромагнитные эффекты также влияют на относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r$ , причем во всём диапазоне частот.

Поскольку в реальности грунт чаще всего неоднородный и измеряемое удельное сопротивление является кажущимся, то корректнее использовать многослойные модели для расчетов.

### Многослойная модель

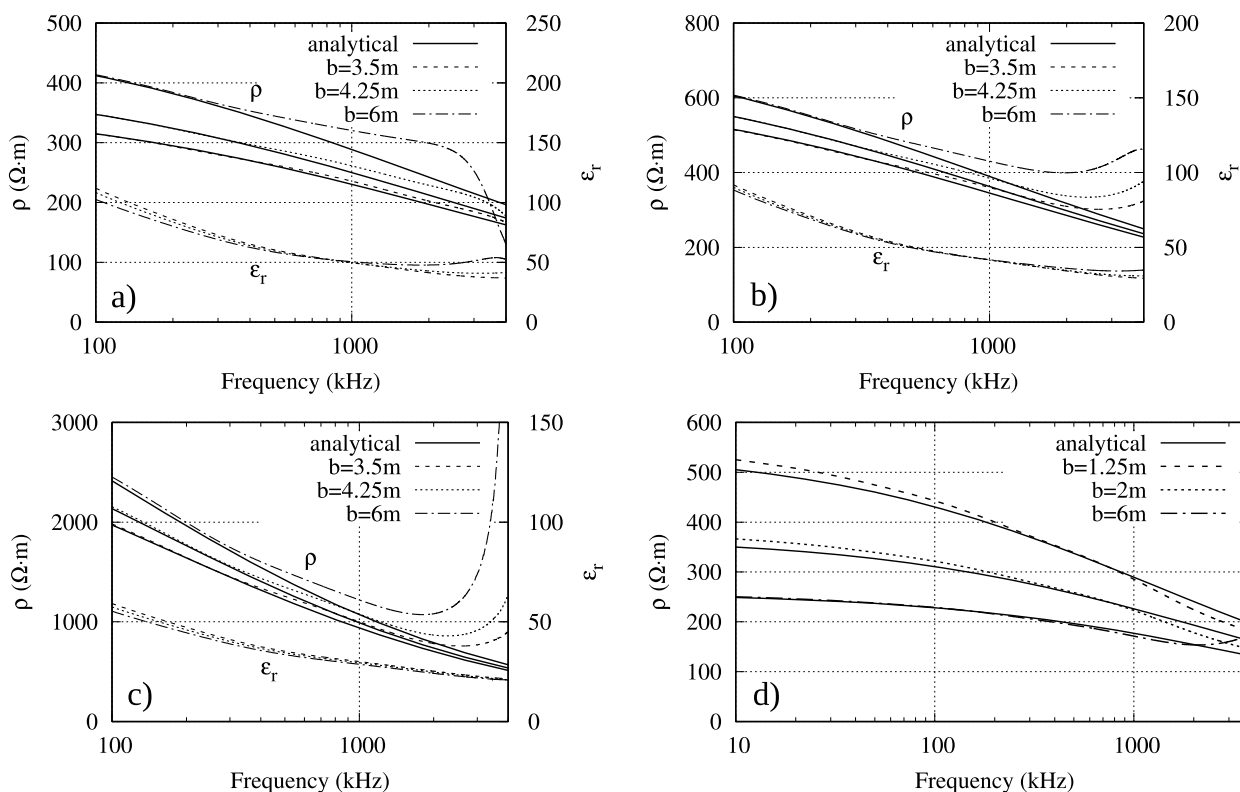
Рассчитаем кажущееся удельное сопротивление грунта для двухслойных моделей аналитически с помощью метода, предложенного в [15], и сравним результаты расчетов с полученными методом FDTD. Для всех многослойных моделей размер ячейки FDTD принимался 0,125 м.

На рисунке 4,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  представлены результаты расчетов для расстояний между диполями  $b$  3,5; 4,25 и 6 м. Рис. 4,  $d$  соответствуют расстояния  $b$  1,25; 2 и 6 м. Соответствующие медианные значения глубины исследования сведены в табл. 1. Подробнее о том, как рассчитывается глубина исследования для установок с перпендикулярным расположением диполей, говорится в [16]. Расчеты проведены для четырех моделей грунта, описание которых дано в табл. 2.

Недостатком используемого аналитического метода является то, что он не учитывает электромагнитных эффектов, поэтому на графиках видно несоответствие результатов с рассчитанными методом FDTD. Очевидно, что для оценки электромагнитных эффектов метод FDTD точнее, хотя и требует гораздо больше вычислительных ресурсов.

Можно видеть, что для моделей с более низкоомным верхним слоем ошибка в удельном сопротивлении появляется с частоты порядка 100 кГц, увеличиваясь с частотой и глубиной исследования. Причем от толщины верхнего проводящего слоя зависит величина этой ошибки. Например, для модели с толщиной верхнего слоя 2 м (см. рис. 4,  $a$ ) ошибка на глубине 1,59 м менее выражена, чем для той же модели с толщиной верхнего слоя 0,75 м (см. рис. 4,  $b$ ).

Для модели с более высокоомным верхним слоем (см. рис. 4,  $d$ ) ошибка наблюдается в диапазоне от 10 кГц до 4 МГц даже на небольшой глубине 0,67 м. Однако в реальной практике такие грунты встречаются нечасто.



**Рис. 4.** Результаты расчетов для двухслойных моделей грунта  
**Fig. 4.** Calculation results for the two-layer soil models

Таблица 1

Значения глубины исследования для рассматриваемых установок  
 Depth of Investigation (DOI) values for the considered dipole-dipole arrays

a (м)	1	1	1	1	1	1
b (м)	1,25	2	3	3,5	4,25	6
DOI (м)	0,67	0,77	1,38	1,59	1,89	2,59

Таблица 2

Параметры грунта  
 Soil parameters

Модель грунта	Сопrotивление, Ом·м		Толщина верхнего слоя, м
	верхнего слоя	нижнего слоя	
a)	250	1000	2
b)	250	1000	0,75
c)	1000	9000	0,75
d)	1000	250	0,75

Высокочастотные эффекты могут быть объяснены не только особенностями измерительной установки, но и задержкой распространения электромагнитных волн в земле. Время задержки распространения обусловлено изменением электрических свойств среды, а именно диэлектрической проницаемостью грунта.

Проведем расчеты для трехслойной модели грунта. Сопротивление верхнего слоя 250 Ом·м, среднего — 1000 Ом·м и нижнего — 9000 Ом·м. Толщина верхнего и среднего слоев 0,75 м. Расстояние между диполями 3; 3,5; 4,25 и 6 м. Соответствующие им значения глубины исследования указаны в табл. 1. Рассчитанные значения кажущегося удельного сопротивления грунта показаны на рис. 5.

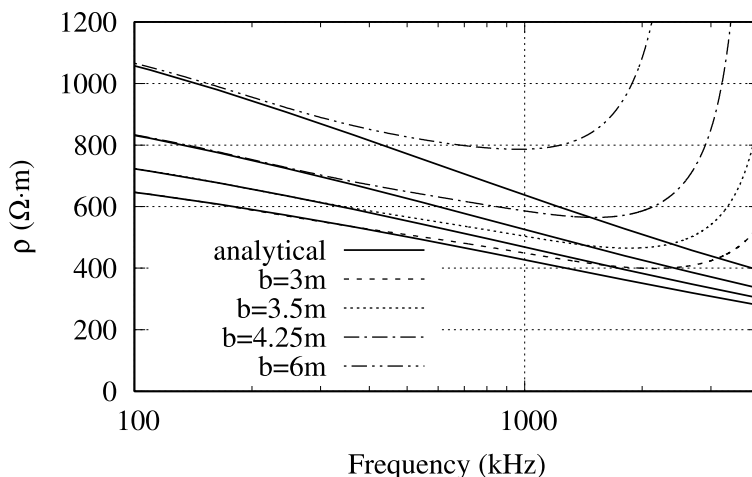


Рис. 5. Результаты расчетов для трехслойной модели грунта  
Fig. 5. Calculation results for the three-layer soil model

Видно, что ошибка на высоких частотах значительна уже на глубине 1,38 м. Можно сделать вывод, что влияние высокочастотных эффектов на результаты измерений сильно зависит от параметров грунта.

### Заключение

В работе были продемонстрированы высокочастотные эффекты, которые влияют на точность измеряемого удельного сопротивления грунта в полевых условиях. С помощью расчетов показано, что по мере увеличения расстояния между диполями (то есть глубины исследования) влияние электромагнитных эффектов усиливается в частотном диапазоне от 100 кГц до 4 МГц.

Чтобы обеспечить высокую точность измерений электрических параметров грунта на высоких частотах, необходимо ограничивать глубину исследования, как уже было отмечено в [3]. Для слоистых грунтов со значительной разницей между слоями стоит ограничиться глубиной примерно 1 м. Глубину исследования можно увеличить примерно до 1,5 м при условии, если грунт низкоомный и толщина верхнего слоя превышает глубину исследования (либо разница между слоями незначительна).

Еще одним возможным решением проблемы ошибок на больших глубинах может быть ограничение частотного диапазона до сотен кГц.

### Список источников

1. Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results / S. Visacro [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2015. Vol. 57, No. 1. P. 121–127.
2. Impact of frequency-dependent soil models on grounding system performance for direct and indirect lightning strikes / M. Nazari [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2020. Vol. 63, No. 1. P. 134–144.

3. Kuklin D. The Impact of apparent frequency-dependent soil properties on electrical grounding Characteristics // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2022. Vol. 64, No. 6. P. 2122–2130.
4. Kuklin D. Device for the field measurements of frequency-dependent soil properties in the frequency range of lightning currents // *Review of Scientific Instruments*. 2020. Vol. 91, No. 11, Art. no. 114701.
5. Visacro S., Alipio R. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes // *IEEE Trans. Power Del.* 2012. Vol. 27, No. 2. P. 927–935.
6. Kuklin D. Numerical analysis of electromagnetic coupling effects in measurements of frequency dependent soil electrical properties // *Prog. Electromagn. Res. M.* 2019. Vol. 79. P. 101–111.
7. Kuklin D. FDTD analysis of the laboratory measurement setup for measurements of frequency-dependent soil properties // *Electr. Power Syst. Res.* 2024. Vol. 229, Art. no. 110187.
8. Dey A., Morrison H. F. Electromagnetic coupling in frequency and time-domain induced-polarization surveys over a multilayered earth // *Geophysics*. 1973. Vol. 38, No. 2. P. 380–405.
9. Taflove A., Hagness S. C. *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005.
10. Heidler F., Cvetic J. A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front // *European Transactions on Electrical Power*. 2002. Vol. 12, No. 2. P. 141–150.
11. Kelley D. F., Destan T. J., Luebbers R. J. Debye function expansions of complex permittivity using a hybrid particle swarm-least squares optimization approach // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007. Vol. 55, No. 7. P. 1999–2005.
12. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2014. Vol. 56, No. 5. P. 1163–1171.
13. Kuklin D., Borozdina E. Estimation of errors related to usage of low-frequency resistivity in measurements of complex soil permittivity // *2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA)*. 2023. P. 1–5.
14. Kuklin D. Open-source software for electrical engineering applications requiring consideration of electrodynamics: Elecode // *GitLab*. URL: <https://gitlab.com/dmika/elecode> (дата обращения: 05.05.2024).
15. Takahashi T., Kawase T. Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure // *IEEE Trans. Power Del.* 1990. Vol. 5, No. 2. P. 604–612.
16. Roy A. Depth of investigation in wenner, three-electrode and dipole-dipole dc resistivity methods // *Geophysical Prospecting*. 1972. Vol. 20, No. 2. P. 329–340.

## References

1. Visacro S., Alipio R., Pereira C., Guimaraes M., Schroeder M. A. O. Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, Vol. 57, No. 1, pp. 121–127.
2. Nazari M., Moini R., Fortin S., Dawalibi F. P., Rachidi F. Impact of frequency-dependent soil models on grounding system performance for direct and indirect lightning strikes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, Vol. 63, No. 1, pp. 134–144.
3. Kuklin D. The Impact of apparent frequency-dependent soil properties on electrical grounding Characteristics. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, Vol. 64, No. 6, pp. 2122–2130.
4. Kuklin D. Device for the field measurements of frequency-dependent soil properties in the frequency range of lightning currents. *Review of Scientific Instruments*, 2020, Vol. 91, No. 11, art. no. 114701.
5. Visacro S., Alipio R. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Trans. Power Del.*, 2012, Vol. 27, No. 2, pp. 927–935.
6. Kuklin D. Numerical analysis of electromagnetic coupling effects in measurements of frequency dependent soil electrical properties. *Prog. Electromagn. Res. M.*, 2019, Vol. 79, pp. 101–111.
7. Kuklin D. FDTD analysis of the laboratory measurement setup for measurements of frequency-dependent soil properties. *Electr. Power Syst. Res.*, 2024, Vol. 229, art. no. 110187.

8. Dey A., Morrison H. F. Electromagnetic coupling in frequency and time-domain induced-polarization surveys over a multilayered earth. *Geophysics*, 1973, Vol. 38, No. 2, pp. 380–405.
9. Taflove A., Hagness S. C. *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method*. Norwood, MA, USA, Artech House, 2005.
10. Heidler, F., Cvetic J. A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. *European Transactions on Electrical Power*, 2002, Vol. 12, No. 2, pp. 141–150.
11. Kelley D. F., Destan T. J., Luebbers R. J. Debye function expansions of complex permittivity using a hybrid particle swarm-least squares optimization approach. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, Vol. 55, No. 7, pp. 1999–2005.
12. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, Vol. 56, No. 5, pp. 1163–1171.
13. Kuklin D., Borozdina E. Estimation of errors related to usage of low-frequency resistivity in measurements of complex soil permittivity. *2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA)*, 2023, pp. 1–5.
14. Kuklin D. Open-source software for electrical engineering applications requiring consideration of electrodynamics: Elecode. GitLab. Available at: <https://gitlab.com/dmika/elecode> (accessed 05.05.2024).
15. Takahashi T., Kawase T. Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure. *IEEE Trans. Power Del.*, 1990, Vol. 5, No. 2, pp. 604–612.
16. Roy A. Depth of investigation in wenner, three-electrode and dipole-dipole dc resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, 1972, Vol. 20, No. 2, pp. 329–340.

#### ***Информация об авторе***

**Е. Д. Бороздина** — инженер.

#### ***Information about the author***

**E. D. Borozdina** — Engineer.

Статья поступила в редакцию 16.05.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.  
The article was submitted 16.05.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.

Научная статья  
УДК 551.594.221  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.008

## АНАЛИЗ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ В 2023 ГОДУ

**Василий Николаевич Селиванов<sup>1</sup>, Александр Николаевич Кизенков<sup>2</sup>,  
Александр Александрович Сулоев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия, v.selivanov@ksc.ru

<sup>2</sup>Производственное отделение «Северные электрические сети» Мурманского филиала  
«Россети Северо-Запад», Мурманск, Россия, kizenkov@ses.kolenergo.ru

<sup>3</sup>Производственное отделение «Центральные электрические сети» Мурманского филиала  
«Россети Северо-Запад», Апатиты, Россия, suloev@ces.kolenergo.ru

### Аннотация

В статье представлены результаты анализа молниевой активности на территории Мурманской области в 2023 г. Приводятся данные о длительности грозового сезона, количестве грозовых дней, числе молниевых разрядов и их распределении по территории. Исследована статистика аварийных отключений воздушных линий электропередачи, вызванных ударами молний в электрические сети Кольской энергосистемы. Представлен сравнительный анализ молниевой активности в соседних с Мурманской областью регионах.

### Ключевые слова:

молниевая активность, грозопеленгация, Мурманская область

### Благодарности:

работа выполнена при финансовой поддержке научно-образовательного центра (НОЦ) мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования» по теме научно-исследовательской работы «Совершенствование флотационного процесса за счет использования селективных комплексообразующих реагентов» в рамках мероприятия программы НОЦ «Разработка горнотехнических решений для запуска производственного цикла Африкандского месторождения».

Original article

## ANALYSIS OF THE 2023 LIGHTNING ACTIVITY IN THE MURMANSK REGION

**Vasilii N. Selivanov<sup>1</sup>, Aleksandr N. Kizenkov<sup>2</sup>, Aleksandr A. Suloev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia, v.selivanov@ksc.ru

<sup>2</sup>Production Department "North Electric Networks" of the Murmansk branch of "Rosseti North-West",  
Murmansk, Russia, kizenkov@ses.kolenergo.ru

<sup>3</sup>Production Department "Central Electric Networks" of the Murmansk branch of "Rosseti North-West",  
Apatity, Russia, suloev@ces.kolenergo.ru

### Abstract

The article presents the results of an analysis of lightning activity in the Murmansk region in 2023. Data on the duration of the thunderstorm season, the number of thunderstorm days, the number of lightning discharges and their distribution over the territory are given. The statistics of emergency failures of overhead power lines caused by lightning strikes in the power grids of the Kola power system are investigated. A comparative analysis of lightning activity in regions neighboring the Murmansk region is presented.

### Keywords:

lightning activity, lightning location, Murmansk region

### Acknowledgments:

The work was supported by the world-class Scientific and Educational Center (REC) "Russian Arctic: new materials, technologies and research methods" on the topic "Improving the flotation process through the use of selective complexing reagents" within the framework of the REC program "Development of mining solutions to launch the production cycle of the Afrikandskoye field".

## Введение

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН с 2013 г. ежегодно выпускает обзоры молниевой активности на территории Мурманской области [1–5] на основе данных сетей грозопеленгации, находящихся в открытом доступе [6]. Приводятся сведения о длительности грозового сезона, количестве грозовых дней, числе молниевых разрядов и их распределении на территории Мурманской области. Для анализа молниевой активности используется программное обеспечение и база данных собственной разработки [7–10]. База данных ресурса содержит информацию о воздушных линиях электропередачи (ВЛ) и подстанциях энергосистемы Мурманской области, а также координаты ударов молнии в землю. Выполненный анализ основан на регистрации только ударов молнии в землю и не учитывает межоблачные и внутриоблачные разряды.

## Анализ молниевой активности

Первая гроза в 2023 г. случилась 20 мая, а последняя отмечена 29 сентября. Всего в 2023 г. было 42 грозовых дня (это день, когда сетью грозопеленгации зарегистрирован хотя бы один удар в землю на территории Мурманской области), причем 7 дней были с одним молниевым разрядом и 9 дней — с числом разрядов от 2 до 5. Так как сеть грозопеленгации регистрирует только разряды в землю, которые составляют от 20 до 50 % от общего числа (остальные разряды — это межоблачные и внутриоблачные), а эффективность сети грозопеленгации не превышает 30 %, можно полагать, что если зафиксирован хотя бы один молниевый разряд, то этот день достоверно можно считать грозовым. В то же время есть вероятность того, что какой-то из грозовых дней не был учтен. Например, в 2023 г. были задокументированы 2 зимние грозы, в феврале и октябре [11; 12], однако сетью грозопеленгации эти разряды не были обнаружены, вероятно, из-за малого значения тока молнии.

В таблице 1 представлены данные о распределении разрядов по месяцам в течение ряда грозовых сезонов. Максимум молниевой деятельности в 2023 г. был в августе, на который пришлось 47 % зарегистрированных разрядов и 9 грозовых дней, причем 20 % от всех разрядов произошли 1 августа 2023 г.

Таблица 1

Распределение разрядов по месяцам года  
Lightning strikes distribution by months of the year

Год	Месяц				
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2017	0 / 0	5 / 83	19 / 1834	11 / 452	3 / 186
2018	5 / 312	6 / 805	11 / 2922	8 / 3430	2 / 7
2019	3 / 317	10 / 3127	5 / 27	6 / 799	4 / 17
2020	0 / 0	8 / 488	16 / 623	12 / 326	2 / 3
2021	4 / 290	13 / 634	16 / 1351	14 / 669	0 / 0
2022	1 / 1	10 / 1212	24 / 5889	13 / 903	0 / 0
2023	5 / 46	9 / 553	12 / 554	9 / 1096	7 / 78

*Примечание.* В числителе — число грозовых дней, в знаменателе — количество разрядов в месяце.  
*Note.* Thunderstorm days / discharges per month.

В таблице 2 представлены данные о молниевой деятельности на территории Мурманской области за последние 7 лет. В 2023 г. молниевая активность была достаточно низкой по всем показателям, но заметна определенная тенденция по увеличению длительности грозового сезона и числа грозовых дней, однако какие-либо выводы можно делать только после анализа более длительных рядов наблюдений. На глобальную молниевую активность могут влиять как климатические изменения на Земле, так и периодические изменения солнечной активности [13].

Тем не менее за последнее десятилетие появился ряд работ, указывающих на однозначную связь роста молниевой активности в Арктике с глобальным потеплением. В работе [14] показано, что соотношение ударов молний, происходящих выше  $65^\circ$  северной широты, по сравнению с общим глобальным количеством ударов, со временем увеличивается, что указывает на то, что Арктика становится все более подверженной воздействию молний. Молниевая деятельность зарегистрирована даже вблизи Северного полюса [15], что ранее считалось принципиально невозможным явлением.

Таблица 2

Показатели молниевой активности на территории Мурманской области  
Lightning activity in Murmansk region

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Первая гроза	10.06.17	14.05.18	11.05.19	02.06.20	18.05.21	16.05.22	20.05.23
Последняя гроза	24.09.17	22.09.18	13.09.19	11.09.20	31.08.21	28.08.22	29.09.23
Грозных дней	38	32	28	38	47	48	42
Всего разрядов	2555	7476	4287	1440	2944	8005	2327

На рисунке 1 отображены результаты регистрации ударов молнии в землю на территории Мурманской области в грозовом сезон 2023 г. Также на карту области нанесены воздушные линии электропередачи классов напряжения 110–330 кВ.

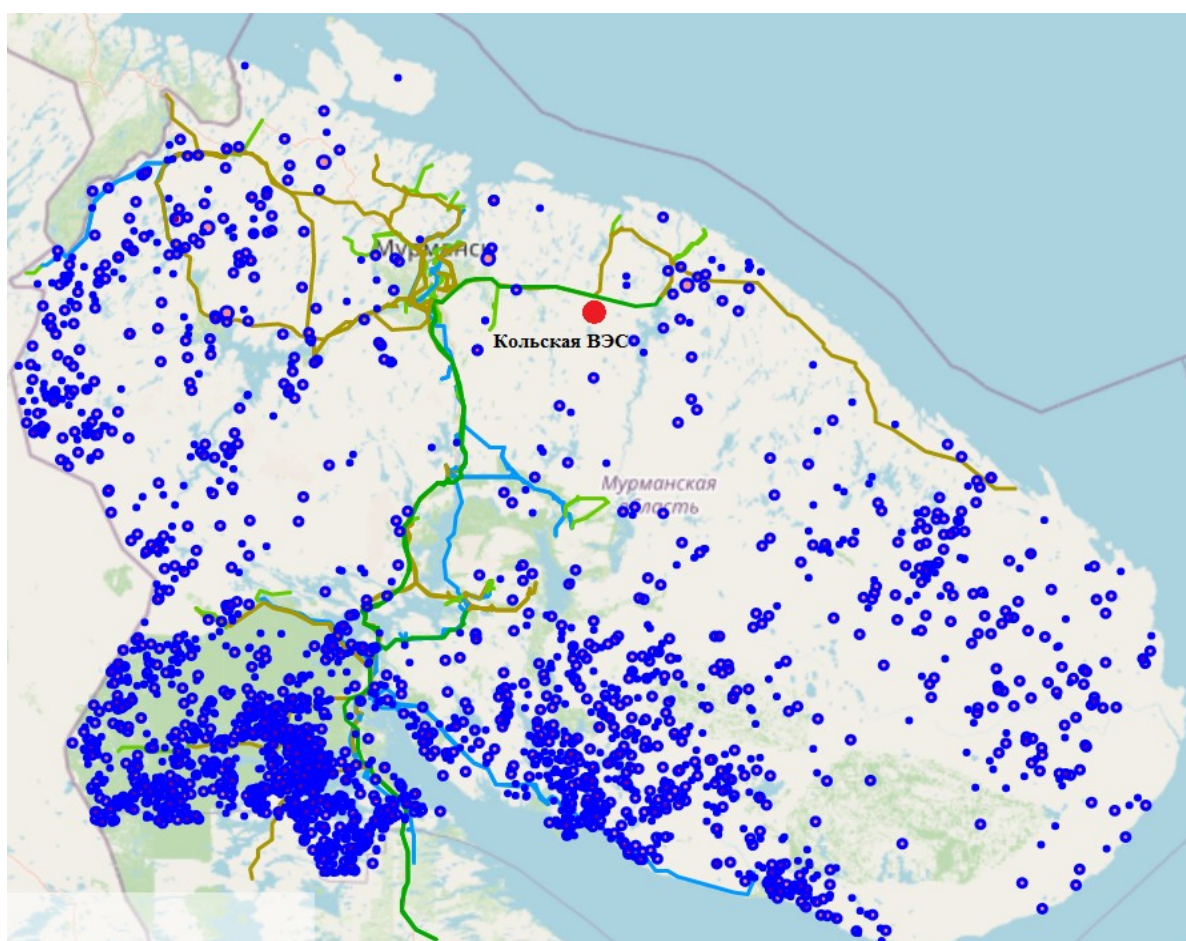
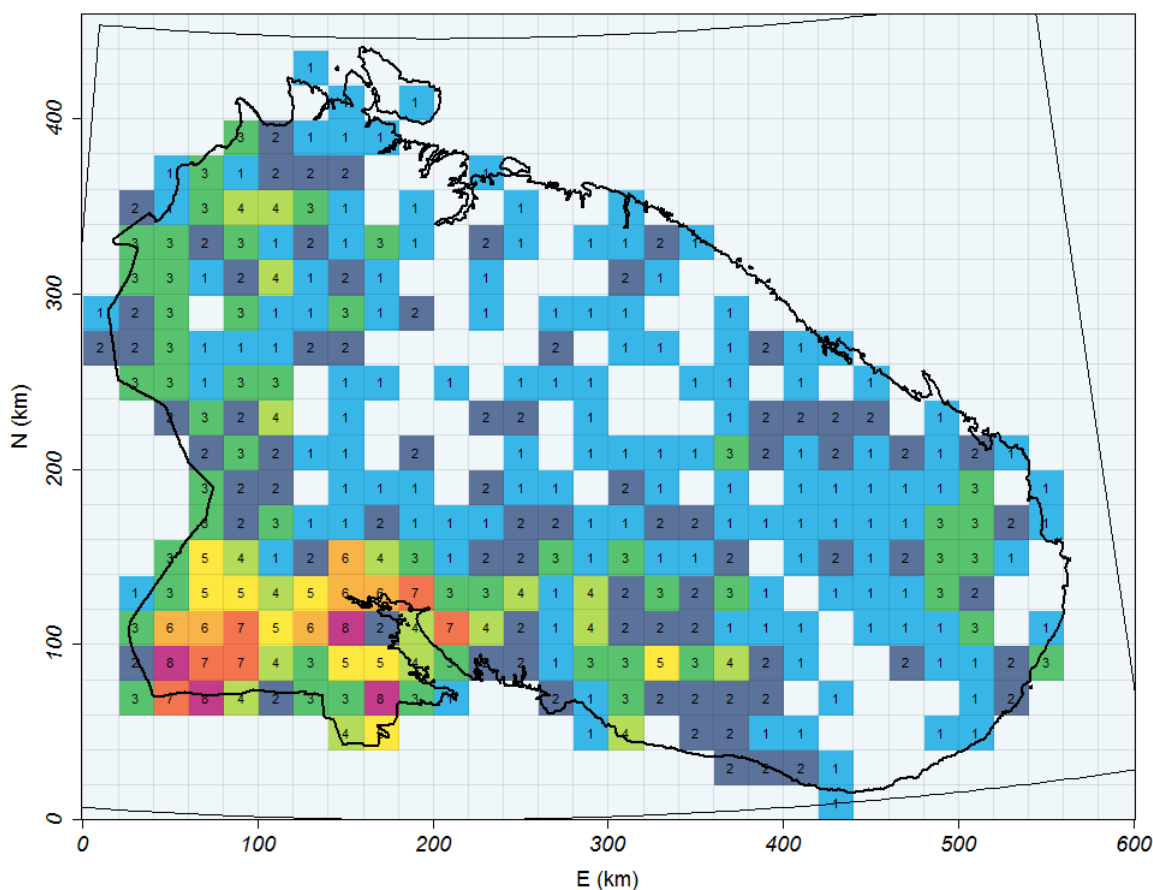


Рис. 1. Молниевые разряды в Мурманской области в 2023 г.  
Fig. 1. Lightning strikes in the Murmansk region in 2023



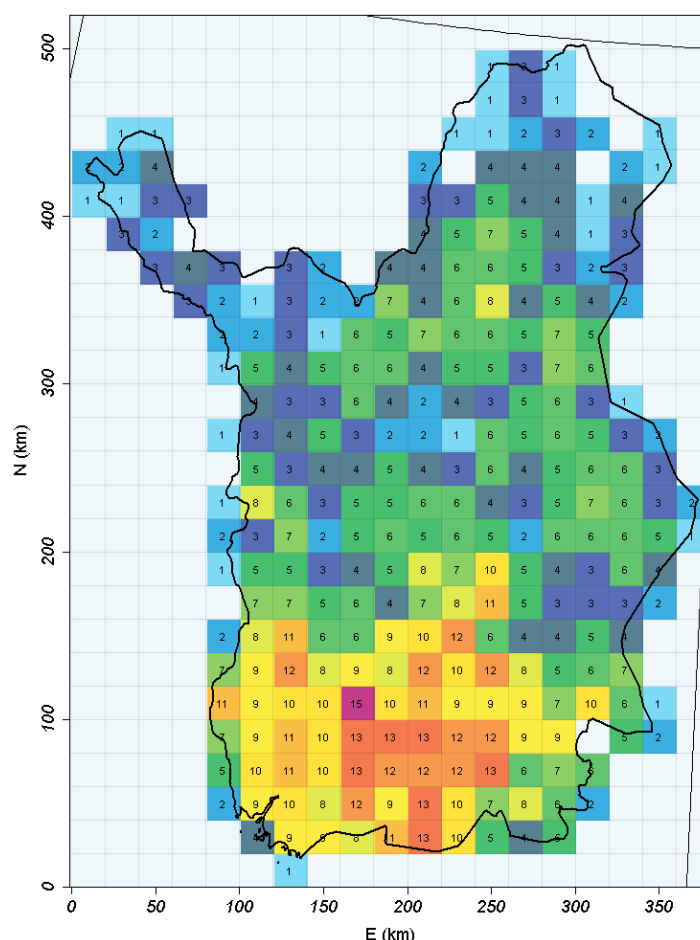
Основная молниевая активность сосредоточена на юге области, на границе с Карелией, в Кандалакшском и Терском районах. Центральная часть Мурманской области, в которой расположены основные промышленные объекты и питающие их линии электропередачи, в 2023 г. оказалась вне зоны молниевой активности. Важно отметить, что при малом числе ударов молнии особенно отчетливо видны их скопления вблизи воздушных линий электропередачи, главным образом в северо-западной части области и вдоль побережья Баренцева моря. В то же время в районе Кольской ветроэлектростанции, где расположены 57 объектов высотой до 140 м на площади 257 га, вообще не зарегистрировано ни одного удара молнии.

На рисунке 2 представлены результаты расчета распределения числа грозовых дней на территории Мурманской области за 2023 г. За день с грозой принимается любой день с одним или более разрядами молнии в землю. Расчеты выполнены для ячеек земной поверхности  $20 \times 20$  км, что приблизительно соответствует области наблюдения за молниевой деятельностью с помощью визуально-слухового метода на гидрометеорологических станциях и постах.



**Рис. 2.** Суммарное количество грозовых дней в ячейке  $20 \times 20$  кв. км в Мурманской области в 2023 г.  
**Fig. 2.** Total number of thunderstorm days in a  $20 \times 20$  square km cell in Murmansk region in 2023

Для сравнения на рисунке 3 представлено аналогичное распределение для соседней с Мурманской областью финской провинцией Лаппи (Лапландия). При видимой схожести распределения (увеличение числа грозовых дней с севера на юг) молниевая активность в Лапландии значительно превосходит таковую в Мурманской области, что связано с более теплым и влажным летним климатом из-за большего влияния Гольфстрима.



**Рис. 3.** Суммарное количество грозных дней в ячейке  $20 \times 20$  кв. км в 2023 г. в провинции Лапландия  
**Fig. 3.** Total number of thunderstorm days in a  $20 \times 20$  square km cell in 2023 in Lapland region of Finland

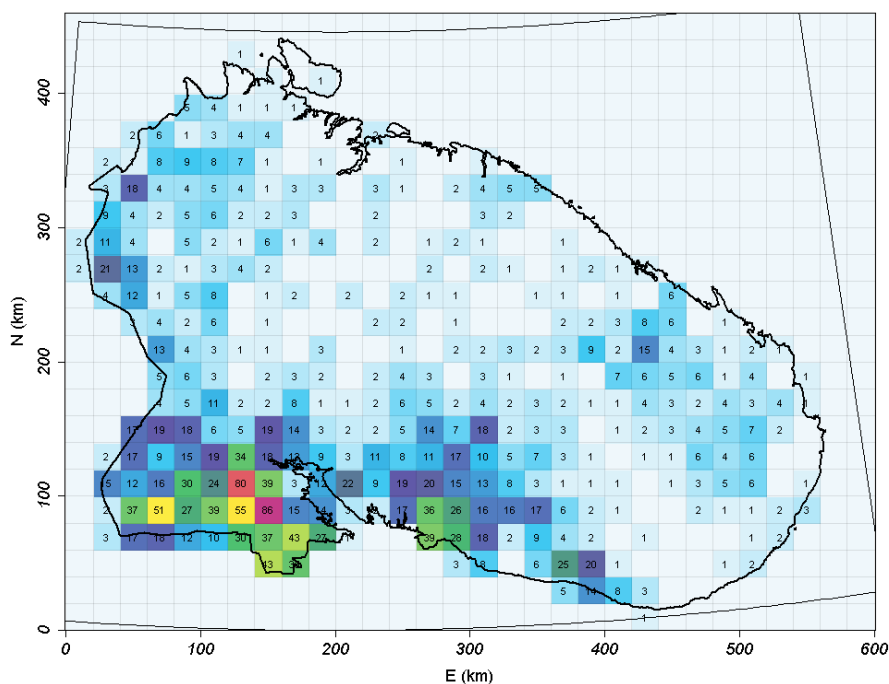
На рисунках 4 и 5 показаны распределения числа разрядов в ячейках  $20 \times 20$  кв. км в 2023 г. на территории Мурманской области и в провинции Лапландия соответственно. В 2023 г. на территории Лапландии зарегистрировано 9259 разрядов в землю, то есть почти в 4 раза больше, причем площадь Мурманской области на 56 % больше (144 902 кв. км против 92 683 кв. км у Лапландии). Таким образом, средняя плотность разрядов в Лапландии в 6 раз выше, что также является следствием более теплого и влажного лета. В табл. 3 для сравнения приведены средние плотности ударов молнии в землю для Мурманской области и соседних регионов.

Таблица 3

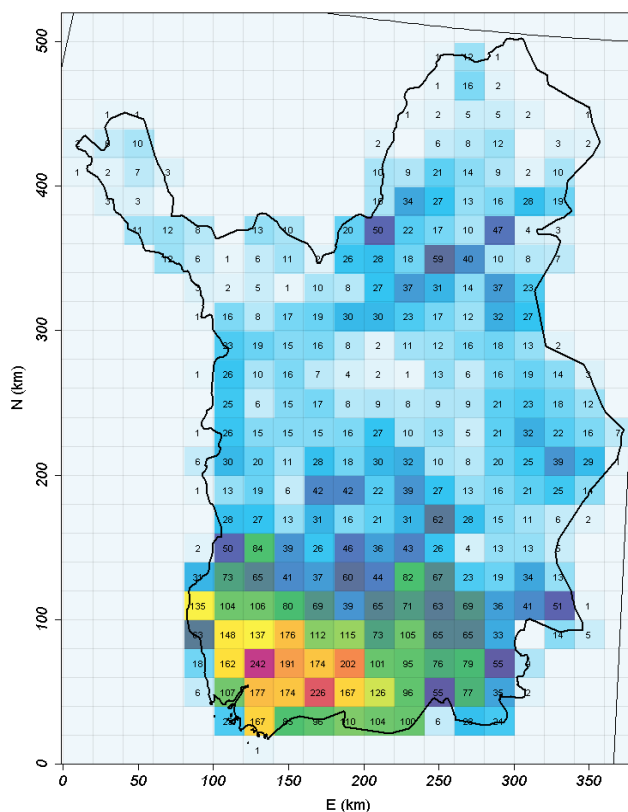
Средние плотности разрядов молнии в северных регионах  
 Average densities of lightning strikes in northern regions

Показатель	Мурманская область	Провинция Лапландия	Республика Карелия	Архангельская область*
Площадь, кв. км	144902	92683	180520	330103
Число разрядов в 2023 г.	2327	9259	28412	27688
Средняя плотность разрядов, шт/кв. км	0,016	0,100	0,157	0,084

\* Материковая часть без Ненецкого автономного округа.  
 \* Mainland without Nenets Autonomous Okrug.



**Рис. 4.** Суммарное число молниевых разрядов в землю в ячейке  $20 \times 20$  кв. км в Мурманской области в 2023 г.  
**Fig. 4.** The total number of lightning strikes in a  $20 \times 20$  square km cell in Murmansk region in 2023



**Рис. 5.** Суммарное число молниевых разрядов в землю в ячейке  $20 \times 20$  кв. км в 2023 г. в провинции Лапландия  
**Fig. 5.** The total number of lightning strikes in a  $20 \times 20$  square km cell in 2023 in Lapland region of Finland

### Анализ аварийности в электрических сетях Мурманской области по причине молниевых воздействий

Несмотря на тот факт, что молниевая активность в Мурманской области низкая, доля отключений линий электропередачи по причине атмосферных перенапряжений выше, чем в регионах с высокой молниевой активностью, и достигает 30 % от общего числа отключений. Причиной этого является высокое удельное сопротивление грунта. С одной стороны, это ограничивает значение тока молнии, но с другой препятствует отводу энергии разряда в землю, что приводит к перекрытию линейной изоляции.

По информации, полученной от служб линий энергетических предприятий Мурманской области, в 2023 г. «грозовые» отключения воздушных линий электропередачи произошли 66 раз, что больше, чем в 2017 и 2021 гг., когда зарегистрированное число разрядов молнии в землю было немногим больше, чем в 2023 г. В табл. 4 представлены сравнительные данные по молниевой активности и числу отключений за период с 2015 по 2023 г., а на рис. 6 эти же данные проиллюстрированы графиком, который демонстрирует явный периодический характер молниевой активности.

Таблица 4

Молниевая активность и грозовые отключения ВЛ в Мурманской области в 2015–2023 гг.  
Lightning activity and lightning outages in the Murmansk region in 2015–2023

Источник	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Число молниевых разрядов в землю	416	8036	2555	7476	4287	1440	2944	8005	2327
Суммарное число отключений ВЛ	9	108	26	120	76	23	50	158	66

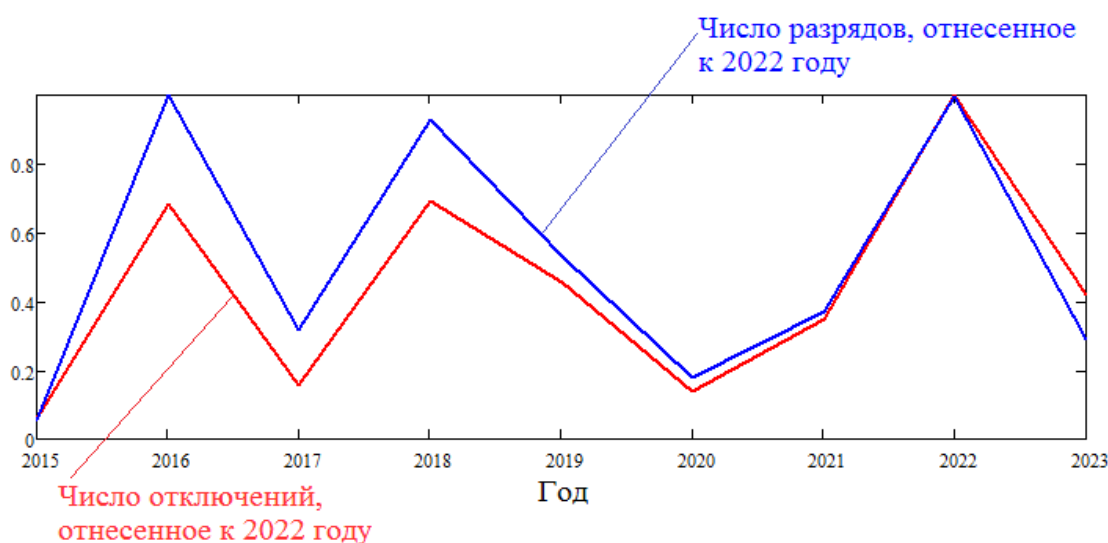
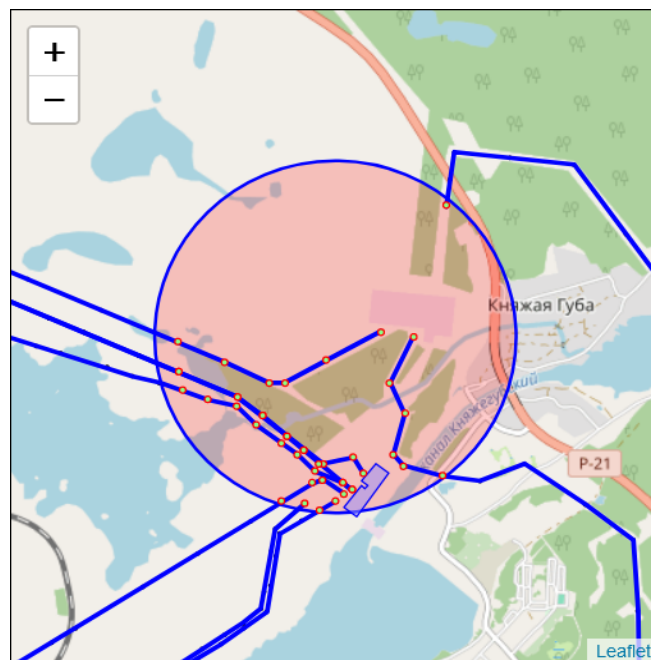


Рис. 6. Молниевая активность и грозовые отключения ВЛ в Мурманской области в 2015–2023 гг.  
Fig. 6. Lightning activity and lightning outages in the Murmansk region in 2015–2023

В 2023 г. зафиксировано 130 событий, в результате которых в зону действия молниевых разрядов попали объекты классов напряжений 35–330 кВ, из них в 7 событиях в зону действия попали подстанции. На рис. 7 показан пример возможной зоны поражения молниевым разрядом, которая определяется погрешностью определения места удара молнии в землю. Неустранимые погрешности локализации разрядов возникают из-за конечного значения скорости света, вследствие погрешностей измерения координат и времени спутниковыми системами позиционирования, но основная причина — это значительная длина канала молнии, которая может достигать нескольких километров. Канал излучает электромагнитную волну, которая принимается антеннами десятков приемников сети грозопеленгации, находящимися на расстоянии сотен километров

от места разряда. Для вычисления координат разряда используется метод ТОА (Time of Arrival), который основан на времени распространения сигнала от источника до приемника [6]. Так как канал молнии не является точечным источником, его координаты определяются с ошибкой, как минимум равной размеру проекции канала молнии на горизонтальную плоскость.



**Рис. 7.** Пример зоны поражения молниевое разряда  
**Fig. 7.** Example of a lightning strike zone

Размер зоны поражения может быть от 1 до 5 км, реальные координаты удара молнии с равной вероятностью находятся в этой области. В приведенном примере размер области поражения составляет 1600 м, в него попали одна подстанция класса 330 кВ, одна ГЭС с распрестройством 110–150 кВ, 45 металлических и деревянных опор ВЛ классов 110, 150 и 330 кВ. Расстояние от центра зоны поражения до ближайшего объекта составило 124 м. Всего в 2023 г. зарегистрировано 5 событий, в которых расстояние от центра зоны поражения до ближайшего объекта было меньше 100 м.

### Заключение

Молниевая активность в Мурманской области в 2023 г. была умеренной, количество разрядов молнии в землю сравнимо с этим показателем в 2017 и 2021 гг. Некоторое относительное увеличение числа грозных отключений линий электропередачи может быть связано с пространственным перераспределением молниевых разрядов и, как следствие, с более частым поражением объектов электроэнергетики в 2023 г. При малом общем числе разрядов и концентрации промышленных объектов на ограниченной территории даже небольшие изменения в направлениях движения грозных фронтов приводят к существенным изменениям в вероятности поражения ВЛ и подстанций.

### Список источников

1. Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М. Анализ результатов регистраций грозовой активности на Кольском полуострове в 2013–2014 гг. // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. Т. 6, № 6 (32). С. 34–40.
2. Анализ результатов регистрации грозовой активности на Кольском полуострове за 2014–2016 годы / А. В. Бурцев [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8, № 8 (15). С. 50–56.

3. Селиванов В. Н., Бурцев А. В., Колобов В. В. Анализ молниевой активности на Кольском полуострове в 2019–2020 гг. // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11, № 7 (19). С. 40–52.
4. Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2021 году / В. Н. Селиванов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 59–67.
5. Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2022 г. / В. Н. Селиванов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 73–83.
6. Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network. 2016. URL: <http://www.blitzortung.org> (дата обращения: 15.08.2022).
7. Программа расчета промежуточных географических координат и построения продольного профиля протяженного объекта с заданным шагом: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619255 / А. В. Бурцев, В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. № 2020618400; заявл. 27.07.2020; опубл. 13.08.2020, Бюл. № 8. 1 с.
8. Программа нахождения объекта, попавшего в зону действия грозового разряда, и оповещения пользователя о данном событии: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619102 / А. В. Бурцев, В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. № 2020618392; заявл. 27.07.2020; опубл. 11.08.2020, Бюл. № 8. 1 с.
9. Программа оценки интенсивности воздействия грозовых разрядов на протяженные объекты: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021618127 / А. В. Бурцев, В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. № 2021616805; заявл. 04.05.2021; опубл. 24.05.2021, Бюл. № 6. 1 с.
10. Молниевые разряды в землю на территории Мурманской области за период 2008–2023 гг.: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624577 / В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. № 2023624352; заявл. 28.11.2023; опубл. 12.12.2023, Бюл. № 12. 1 с.
11. В Снежногорске прогремела гроза // Вечерний Мурманск. URL: [https://vmnews.ru/nov\\_22/2023/02/14/v-snezhnogorske-progremela-groza](https://vmnews.ru/nov_22/2023/02/14/v-snezhnogorske-progremela-groza) (дата обращения: 17.04.2024).
12. В Мурманске прогремела зимняя гроза // Вечерний Мурманск. URL: [https://vmnews.ru/nov\\_22/2023/10/17/v-murmanske-progremela-zimnyaya-groza](https://vmnews.ru/nov_22/2023/10/17/v-murmanske-progremela-zimnyaya-groza) (дата обращения: 17.04.2024).
13. Williams E. R. Lightning and climate: A review // Atmospheric Research. 2005. Vol. 76. P. 272–287.
14. Lightning in the Arctic / R. H. Holzworth [et al.] // Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48, No 7. e2020GL091366.
15. Thunderstorms near the North Pole / A. Popykina [et al.] // Atmosphere. 2024. Vol. 15, No 3. 310.

## References

1. Burtsev A. V., Nevretdinov Yu. M. Analiz rezul'tatov registratsiy grozovoy aktivnosti na Kol'skom poluostrove v 2013–2014 gg. [Analysis of lightning activity registration results on the Kola Peninsula in 2013–2014]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2015, Vol. 6, No. 6 (32), pp. 34–40. (In Russ.).
2. Burtsev A. V., Yaroshevich V. V., Fastiy G. P., Karpov A. S. Analiz rezul'tatov registratsii grozovoy aktivnosti na Kol'skom poluostrove za 2014–2016 gody [Analysis of lightning activity registration results in the Kola Peninsula in 2014–2016]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2017, Vol. 8, No. 8 (15), pp. 50–56. (In Russ.).
3. Selivanov V. N., Burtsev A. V., Kolobov V. V. Analiz molnievoy aktivnosti na Kol'skom poluostrove v 2019–2020 gg. [Analysis of lightning activity on the Kola Peninsula in 2019–2020]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2020, Vol. 11, No. 7 (19), pp. 40–52. (In Russ.).
4. Selivanov V. N., Burtsev A. V., Ivonin V. V., Kolobov V. V. Analiz molnievoy aktivnosti v Murmanskoy oblasti v 2021 godu [Analysis of lightning activity in the Murmansk region in 2021]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, Vol. 13, No. 3, pp. 59–67. (In Russ.).

5. Selivanov V. N., Burtsev A. V., Kizenkov A. N., Suloev A. A. Analiz molnievoy aktivnosti v Murmanskoy oblasti v 2022 godu [Analysis of lightning activity in the Murmansk region in 2022]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS. Series: Engineering Sciences], 2023, Vol. 14, No. 6, pp. 73–83. (In Russ.).
6. Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network, 2016. Available at: <http://www.blitzortung.org> (accessed 02.05.2023).
7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. *Programma raschyota promezhutochnykh geograficheskikh koordinat i postroeniya prodol'nogo profilya protyazhonnogo ob'ekta s zadannym shagom* [Program for estimation of intermediate geographical coordinates and construction of longitudinal profile of an extended object with a set step]. The certificate of state registration of the computer program. No. 2020619255, claimed 27.07.2020, published 13.08.2020, bul. No. 8, 1 p. (In Russ.).
8. Burtsev A. V., Selivanov V. N. *Programma nahozhdeniya ob'ekta, popavshego v zonu deystviya grozovogo razryada, i opoveshcheniya pol'zovatelya o dannom sobytii* [A program for finding an object that has fallen within the range of a lightning discharge and notifying the user about this event]. The certificate of state registration of the computer program. No. 2020619102, claimed 27.07.2020, published 11.08.2020, bul. No. 8, 1 p. (In Russ.).
9. Burtsev A. V., Selivanov V. N. *Programma otsenki intensivnosti vozdeystviya grozovykh razryadov na protyazhonnnye ob'ekty* [Program for assessing the intensity of the impact of lightning discharges on extended objects]. The certificate of state registration of the computer program. No. 2021618127, claimed 04.05.2021, published 24.05.2021, bul. No. 6, 1 p. (In Russ.).
10. Selivanov V. N. *Molnievye razryady v zemlyu na territorii Murmanskoy oblasti za period 2008–2023 gg.* [Lightning discharges into the ground in the Murmansk region for the period 2008–2023]. The certificate of state registration of the database No. 2023624577, claimed 28.11.2023, published 12.12.2023, bul. No. 12, 1 p. (In Russ.).
11. V Murmanske progremela zimnyaya groza [A winter thunderstorm hit Murmansk]. *Vecherniy Murmansk* [Evening Murmansk newspaper]. (In Russ.). Available at: [https://vmnews.ru/nov\\_22/2023/10/17/v-murmanske-progremela-zimnyaya-groza](https://vmnews.ru/nov_22/2023/10/17/v-murmanske-progremela-zimnyaya-groza) (accessed 17.04.2024).
12. V Snezhnogorske progremela groza [A thunderstorm hit Snezhnogorsk]. *Vecherniy Murmansk* [Evening Murmansk newspaper]. (In Russ.). Available at: [https://vmnews.ru/nov\\_22/2023/02/14/v-snezhnogorske-progremela-groza](https://vmnews.ru/nov_22/2023/02/14/v-snezhnogorske-progremela-groza) (accessed 17.04.2024).
13. Williams E. R. Lightning and climate: A review. *Atmospheric Research*, 2005, Vol. 76, pp. 272–287.
14. Holzworth R. H., Brundell J. B., McCarthy M. P., Jacobson A. R., Rodger C. J., Anderson T. S. Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 2021, Vol. 48, No 7, e2020GL091366.
15. Popykina A., Ilin N., Shatalina M., Price C., Sarafanov F., Terentev A., Kurkin A. Thunderstorms Near the North Pole. *Atmosphere*, 2024, Vol. 15, No 3, 310.

#### **Информация об авторах**

**В. Н. Селиванов** — кандидат технических наук, директор;  
**А. Н. Кизенков** — начальник службы воздушных линий электропередачи;  
**А. А. Сулоев** — начальник службы воздушных линий электропередачи.

#### **Information about the authors**

**V. N. Selivanov** — PhD (Engineering), Director;  
**A. N. Kizenkov** — Chief of Overhead Power Line Service;  
**A. A. Suloev** — Chief of Overhead Power Line Service.

Статья поступила в редакцию 24.05.2024; одобрена после рецензирования 04.06.2024; принята к публикации 06.06.2024.  
The article was submitted 24.05.2024; approved after reviewing 04.06.2024; accepted for publication 06.06.2024.

Научная статья  
УДК 621.319.53; 537.529; 621.926  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.009

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО КВАРЦА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ

**Андрей Александрович Климов<sup>1</sup>, Виталий Валентинович Колобов<sup>2</sup>,  
Александр Сергеевич Потокин<sup>3</sup>**

<sup>1, 2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>3</sup>«Технологии электроимпульсной дезинтеграции материалов», Апатиты, Россия

<sup>1</sup>a.klimov@ksc.ru

<sup>2</sup>v.kolobov@ksc.ru

<sup>3</sup>electric.pulse@mail.ru

### Аннотация

В работе рассматривается эффективность разрушения искусственных кристаллов кварца, выращенных гидротермальным методом. Приводятся данные по удельным энергетическим затратам на разрушение с помощью электроимпульсного и электрогидравлического воздействий. Показано, что при доведении кварцевого материала до размеров менее 1 мм электроимпульсным воздействием в полезную фракцию менее 0,5 мм переходит более 60 % продукта по массе. При этом снижение прикладываемого напряжения приводит к повышению средней крупности продукта. В экспериментах по дальнейшему доизмельчению материала больше 0,5 мм электрогидравлическим воздействием было выявлено, что эффективность разрушения кварца при данном методе зависит в большей степени не от энергии в импульсе, а от скорости ее выделения, и для повышения производительности процесса необходимо применять разряды с высокой бризантностью.

### Ключевые слова:

электрофизическое воздействие, электрогидроимпульсное разрушение, электроимпульсное разрушение, искусственный кварц

### Благодарности:

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

Original article

## PRODUCTION OF SYNTHETIC QUARTZ POWDERS BY ELECTRIC DISCHARGE FRAGMENTATION

**Andrey A. Klimov<sup>1</sup>, Vitalii V. Kolobov<sup>2</sup>, Aleksandr S. Potokin<sup>3</sup>**

<sup>1, 2</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

<sup>3</sup>Technologies of Electro-pulse Disintegration of Materials, Apatity, Russia

<sup>1</sup>a.klimov@ksc.ru

<sup>2</sup>v.kolobov@ksc.ru

<sup>3</sup>electric.pulse@mail.ru

### Abstract

The paper considers the efficiency of destruction of artificial quartz crystals synthesized by hydrothermal method. The data on specific energy consumption for destruction by means of electric pulse and electrohydraulic impacts are given. It is shown that when quartz material fractured to the size of less than 1 mm by electric pulse impact more than 60% of the product by mass corresponds to the useful fraction of less than 0.5 mm. At the same time reduction of the applied voltage leads to an increase in the average product coarseness. In experiments on further additional fragmenting of material larger than 0.5 mm by electrohydraulic impact it was revealed that the efficiency of quartz destruction by this method depends, to a greater extent, not on the pulse energy, but on the rate of energy release, and to increase the productivity of the process it is necessary to use discharges with high brisance.

### Keywords:

electrophysical impact, electro-hydraulic fragmentation, high-voltage pulse fragmentation, artificial quartz

### Acknowledgments:

This 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).



## Введение

Природные и искусственные образцы кварца могут применяться как в виде цельных обработанных изделий, так и в виде измельченного продукта в различных областях деятельности человека, включая электронику, оптику, строительство, медицину, керамическую промышленность. Кварц может использоваться и в качестве абразивного материала, поскольку обладает показателем твердости 7 по шкале Мооса, что ставит его на один уровень с другим природным абразивом — гранатом. Увеличение потребности в кварце также обусловлено разрастанием производства солнечных панелей из-за тенденции перехода большинства стран к возобновляемым источникам энергии. Однако практически в каждой из этих областей применения неуклонно возрастают требования к химической чистоте кварцевого материала и совершенству его структуры. Особой чистотой отличаются синтетические кристаллы кварца, получаемые гидротермальным синтезом — выращиваемые из водного раствора оксида при высоких температурах и давлении [1]. Чаще всего для непосредственного использования такого чистого кварца, например, в случае изготовления кварцевых стёкол с высокой оптической прозрачностью, необходимо его измельчение до фракций требуемого размера.

Механическое дробление кварца, являющееся начальной стадией производства чистого минерального материала, сопряжено с образованием пыли и внесением в продукт очень мелкого помола аппаратурного металла, что требует введения ступеней магнитной сепарации и кислотного выщелачивания для получения высококачественной кварцевой крупки или пыли. Электрофизические методы разрушения, в отличие от механического измельчения, лишены данных недостатков, поскольку рабочим органом в них является высокоэнергетический электрический разряд, а воздействие на материал производится в водной среде. Проводимые ранее исследования в этой области были, в основном, сосредоточены на селективном дроблении природных кристаллов кварца и их очистке от примесей [2], а также на получении зерен заданной формы и определенного фракционного состава [3]. Результаты этих работ показывают высокую эффективность электрогидравлического разрушения природного кварца, имеющего в своей структуре множество дефектов и включений. Автором работы [4] показано, что при электроразрядном разрушении кварца не происходит изменения его структурных свойств и свойств системы «вода — минерал» под действием высокотемпературной плазмы, что также говорит о потенциале применения предлагаемых технологий.

Однако практически отсутствуют данные о разрушении разрядами синтетических монокристаллов. В связи с этим в ЦЭС КНЦ РАН были проведены экспериментальные исследования дробления и измельчения образцов искусственного кварца с помощью электроимпульсного и электрогидравлического воздействий до фракций менее 500 мкм и проанализирована эффективность примененных методов.

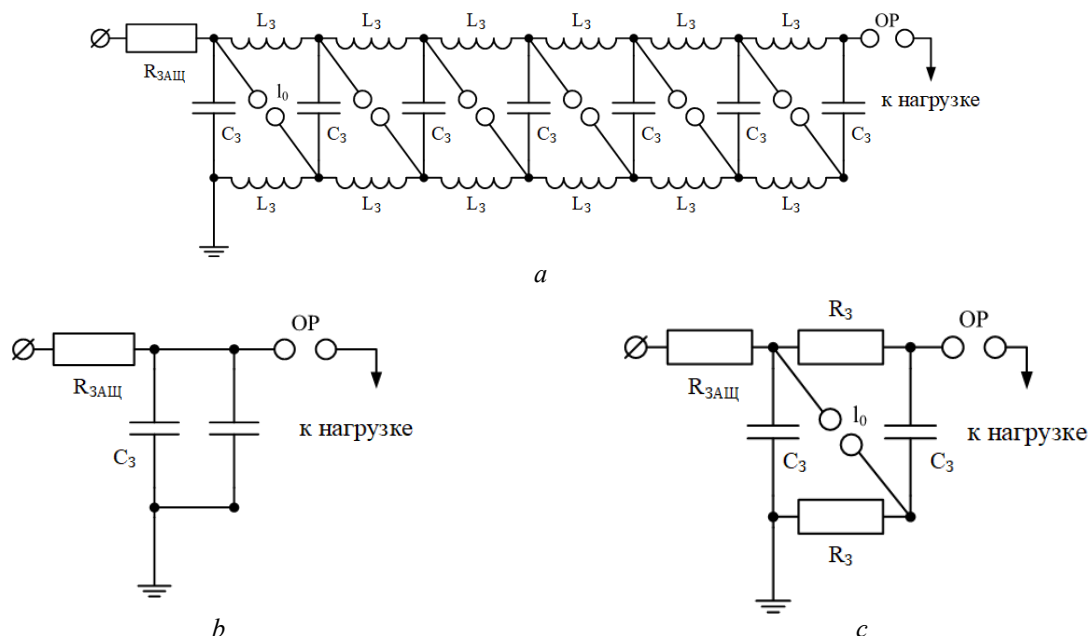
## Экспериментальная часть

В экспериментах по электрофизическому разрушению кварца были задействованы три схемных решения высоковольтных генераторов:

- 1) генератор импульсных напряжений (ГИН) 315/0,028 из 7 ступеней с запасаемой в накопителях энергией до 1,4 кДж и амплитудой напряжения до 315 кВ (рис. 1, *a*);
- 2) генератор импульсных токов (ГИТ) 48/0,76 с максимальным напряжением в разряде 48 кВ и энергией 876 Дж (рис. 1, *b*);
- 3) 2-ступенчатый генератор ГИН 96/0,19, составленный из тех же конденсаторов, что и ГИТ 48/0,76, и обладающий той же энергией в импульсе, но создающий импульсы с амплитудой 96 кВ (рис. 1, *c*).

В таблице 1 приведены основные энергетические параметры созданных генераторов. Схема ГИН 315/0,028 была задействована в опытах с максимальным напряжением и со сниженным практически в 2 раза для выявления влияния амплитуды импульса на фракционные характеристики измельченного кварца. ГИН 96/0,19 представлял собой перестроенный ГИТ 48/0,76 с добавленными

для разделения ступеней зарядными резисторами и задающим разрядником. Энергия в импульсе двух этих генераторов оставалась одинаковой, однако при перестройке изменялся характер импульсного воздействия на разрушаемый материал, что будет показано далее.



**Рис. 1.** Установки для осуществления электрофизического воздействия на кварц:  
*a* — ГИН 315/0,028; *b* — ГИТ 48/0,76; *c* — ГИН 96/0,19;  $I_0$  — задающий разрядник;  
 ОП — отделительный разрядник;  $R_{зашц}$  — защитное сопротивление;  $C_3$  — зарядная емкость;  
 $L_3$  — зарядная индуктивность;  $R_3$  — зарядное сопротивление

**Fig. 1.** Shapes, surface features and defects of synthetic quartz samples:  
*a* — pulse voltage generator (PVG) 315/0,028; *b* — pulse current generator (PCG) 48/0,76; *c* — PVG 96/0,19;  
 $R_{зашц}$  — current-limiting resistance;  $I_0$  — initiating spark gap; ОП — separating spark gap;  
 $C_3$  — charging capacitance;  $L_3$  — charging inductance;  $R_3$  — charging resistance

Таблица 1

Энергетические параметры примененных генераторов  
 Energy parameters of the applied generators

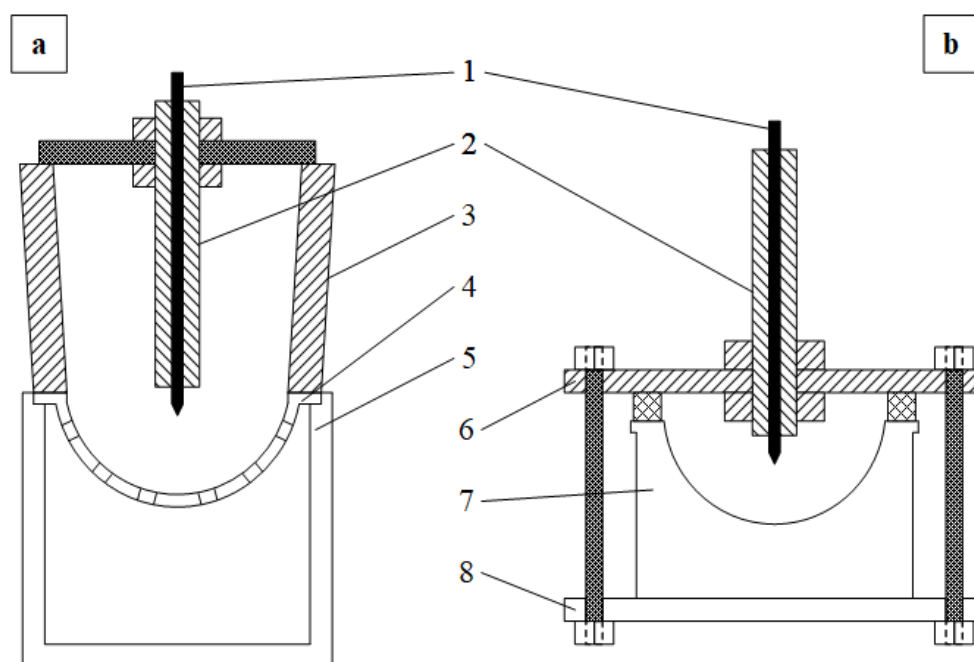
Тип генератора	ГИН 320/0,028	ГИТ 48/0,76	ГИН 96/0,19
Напряжение в импульсе, кВ	320	168	48
Емкость в разряде, мкФ	0,028	0,028	0,76
Максимальная энергия в импульсе, Дж	1418	403	876

Для осуществления полного цикла дробления и измельчения с целью доведения образцов до крупности менее 0,5 мм был использован процесс, состоящий из двух этапов:

- электроимпульсное дробление больших кусков кристаллов с помощью ГИН 315/0,028 до крупности менее 1 мм;
- дальнейшее электрогидравлическое измельчение нераздробленного материала и части продукта с предыдущего этапа с помощью ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19.

Конструкция дробильно-измельчительных камер, в которых осуществлялось электрофизическое воздействие, подробно описана в работах [5; 6], а на рис. 2 обозначены лишь основные элементы этих камер. Во всех экспериментах воздействие на кварц производилось в очищенной методом обратного осмоса воде с удельной проводимостью порядка 15 мкСм/см.

Крупнокусовое разрушение кристаллов проводилось методом электроимпульсной дезинтеграции с помощью ГИН 315/0,028 в большой измельчительной камере (БИК, рис. 2, *a*). Рабочим органом камеры являлась электродная пара с конфигурацией «остриё — полусфера», в промежутке которой происходил высоковольтный пробой дробимого кварца при подаче на рабочие электроды импульсов с длительностью фронта около 160–170 нс. Потенциальный электрод представлял собой заостренный стальной стержень, закрепленный внутри проходного изолятора. Металлические сита-классификаторы полусферической формы являлись заземленным электродом. В процессе работы генератора кремнезем удалялся из зоны дробления при достижении размеров меньше диаметра отверстий сита и скапливался в баке для продукта. Разрушение твердого тела происходило как за счет работы расширения образовавшегося при пробое тела канала разряда, так и за счет ударных волн, распространяющихся в толще материала и жидкой среде.



**Рис. 2.** Камеры для крупнокусового дробления и измельчения синтетических кристаллов:  
*a* — большая измельчительная камера; *b* — малая измельчительная камера; 1 — высоковольтный электрод;  
2 — проходной изолятор; 3 — полиэтиленовый корпус; 4 — заземленное сито-классификатор; 5 — бак для сбора  
продукта; 6 — полиэтиленовая пластина; 7 — заземленная стальная чаша; 8 — металлическая пластина

**Fig. 2.** Vessels for coarse crushing and fragmenting of synthetic crystals:  
*a* — large fragmenting vessel; *b* — small fragmenting vessel; 1 — high-voltage electrode;  
2 — bushing insulator;  
3 — polyethylene housing; 4 — grounded sieve; 5 — product collection tank; 6 — polyethylene plate;  
7 — grounded steel bowl; 8 — metal plate

В экспериментах по разрушению с помощью электрогидравлического воздействия при работе ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19 использовалась малая измельчительная камера (МИК, рис. 2, *b*). Для осуществления высоковольтного пробоя водного промежутка с измельчаемой породой применялась система электродов с конфигурацией «остриё — чаша». В качестве потенциального электрода использовался заостренный латунный стержень. Вторым электродом, установленным на заземленную металлическую пластину, являлся цельный стальной цилиндр с глубокой полусферической выемкой в верхней части. В отличие от БИК, камера МИК сверху была закрыта полиэтиленовой пластиной, к которой стальная чаша прижималась через изоляционную прокладку. Таким образом обеспечивалась герметизация зоны разрушения для

предотвращения выброса материала из камеры при возникновении гидроудара от пробоя воды. При электрогидравлическом воздействии был невозможен пробой дробимого кварца, и разрушение происходило за счет воздействия прямых и отраженных ударных и акустических волн, генерируемых разрядом в водных прослойках между частицами материала.

В качестве образцов для разрушения использовались крупные цельные кристаллы синтетического кварца, выращенные гидротермальным методом и отбракованные при производстве из-за дефектов структуры (рис. 3). Образцы содержали в себе фрагменты проволоки для крепления заправки, которые располагались в толще кристаллов вдоль малых торцов. Геометрические параметры и масса образцов указаны в табл. 2.



**Рис. 3.** Формы, особенности поверхности и дефекты образцов синтетического кварца  
**Fig. 3.** Shapes, surface features and defects of synthetic quartz samples

*Таблица 2*

Характеристики кристаллов кварца  
Characteristics of quartz crystals

№ образца	Максимальный размер, см	Толщина, см	Объем, см <sup>3</sup>	Масса, г
1	19	4,0	689	1791
2	22	4,4	660	1717

Большие плоскости образца № 1 были покрыты небольшими выпуклыми образованиями — подобная бугристость не наблюдается у природных кристаллов. Образец имел крупную трещину по центру, проходящую до середины образца от края до края торцевых плоскостей. Другая трещина проходила от одного из торцов через верхнюю большую плоскость и не доходила до противоположного торца. Однако ограниченный данными дефектами фрагмент не отделялся от основной части образца. Все плоские поверхности кристалла были оптически прозрачны.

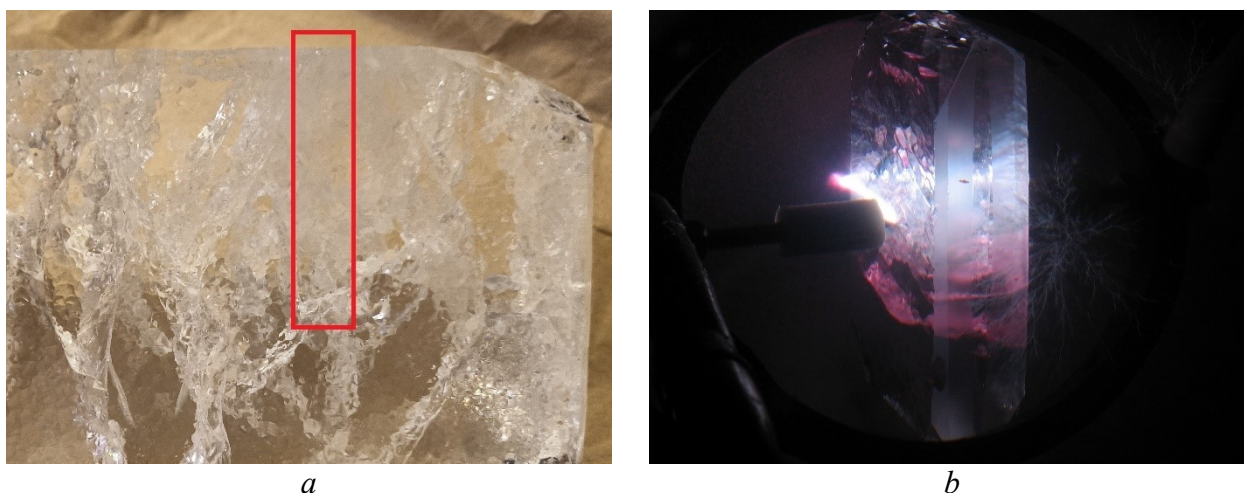
Самые большие поверхности образца № 2 также были покрыты образованиями, но они были крупнее, чем у образца № 1. Образец не имел видимых дефектов; почти все его плоскости, за исключением одной, были прозрачны. Непрозрачная плоскость была образована срезом или спилом, сделанным абразивным материалом.

Средняя крупность продукта рассчитывалась как средневзвешенный размер частиц из диапазонов размеров, полученных после ситования на лабораторных ситах со следующими размерами ячеек: 15; 10; 5; 4,2; 3; 2; 1; 0,5; 0,25 мм. Степень дробления определялась как отношение средней крупности исходной навески кварца к средней крупности полученного продукта.

### Результаты и обсуждение

Первоначальные опыты по высоковольтному пробоем рассмотренных образцов искусственного кварца в электродной системе «острие — острие» показали, что в системе с таким уровнем неоднородности поля для внедрения разряда даже в дефектный кристалл при длине межэлектродного промежутка 40÷44 мм требуются напряжения выше 315 кВ при длительности фронта импульса порядка 160÷170 нс, либо необходимо использование жидкости с большей электрической прочностью.

В экспериментах с обоими образцами разряд прошел по поверхности материала, последствия перекрытия показаны на рис. 4. Однако напряженности в системах «остриё — сито» и «остриё — чаша» выше, чем в системе «остриё — остриё», а разряды при электроимпульсном воздействии имели возможность развиваться по уже появившимся в структуре материала дефектам. Поэтому дробление в БИК происходило по большей части с пробоем материала.



**Рис. 4.** Иллюстрации прохождения канала разряда по поверхности образцов кварца:

*a* — след от канала разряда на образце № 1; *b* — фотография поверхностного разряда на образце № 2

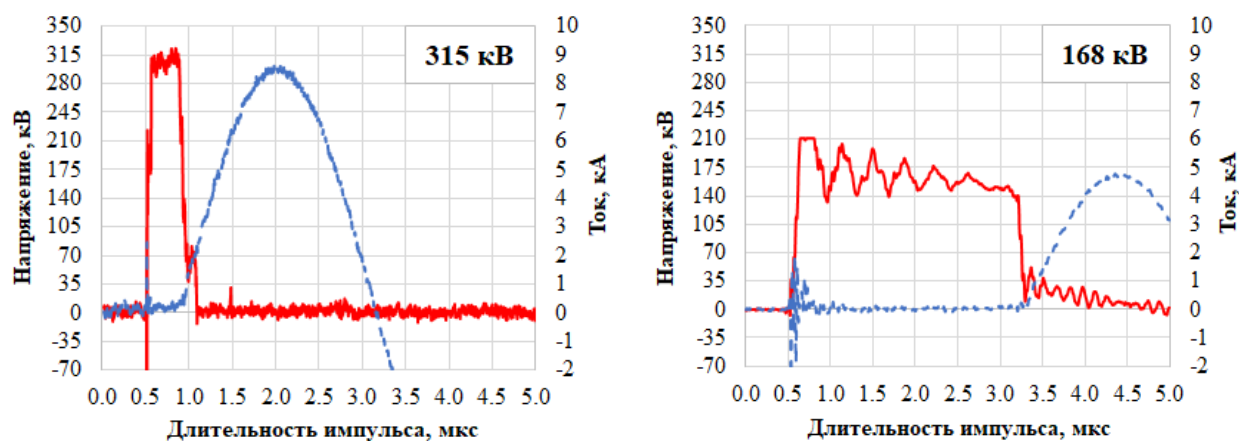
**Fig. 4.** Illustrations of a discharge channel passing over the surface of quartz samples:

*a* — trace of the discharge channel on sample no. 1; *b* — photograph of the surface discharge on sample no. 2

Оба образца были разрушены на 2–4 крупных куска образовавшейся от канала разряда ударной волной. На рис. 4, *a* можно рассмотреть расходящиеся в толще кристалла от торца, по которому прошел канал, многочисленные мелкие трещины, далее переходящие в крупные разломы по всему объему образца. Также под правым торцом можно выделить такие же мелкие разветвленные трещины, образованные внутренним отражением части ударной волны от торца образца. О разрушениях подобного рода сообщалось в работе [7], посвященной изучению распространения трещин в цементных образцах при электрогидравлическом воздействии на них.

В исследованиях по электроимпульсному дроблению горных пород и абразивных материалов в электродной системе с потенциальным остриём и заземленным ситом-классификатором, проводившихся ранее в ЦЭС КНЦ РАН, задействовались сита с ячейками 15, 5, 2 и 1 мм последовательно [8]. Эксперименты с кремнеземом показали, что из-за его крайне высокой хрупкости возможно увеличение степени дробления за одну стадию без критического роста удельных энергозатрат по сравнению с другими рассмотренными материалами. Поэтому эксперименты с кристаллами кварца осуществлялись последовательно на классификаторах 15 и 1 мм.

Разрушение образцов кварца проводилось при двух уровнях выходного напряжения ГИН и энергиях в импульсе соответственно: образца № 1 при 315 кВ (1418 Дж в импульсе) и образца № 2 при 168 кВ (403 Дж в импульсе). При одной и той же длине рабочего промежутка в 50 мм осциллограммы напряжения и тока на нагрузке имели значительные отличия (рис. 5): так, при воздействии напряжения 315 кВ пробой происходил после задержки около 1,5 мкс в среднем и величина развиваемого тока через образованный канал составляла порядка 8–10 кА, тогда как при воздействии напряжения 168 кВ средняя задержка пробоя увеличилась до 3,2 мкс, а развиваемый ток в контуре нагрузки снизился до величины 4–5 кА.

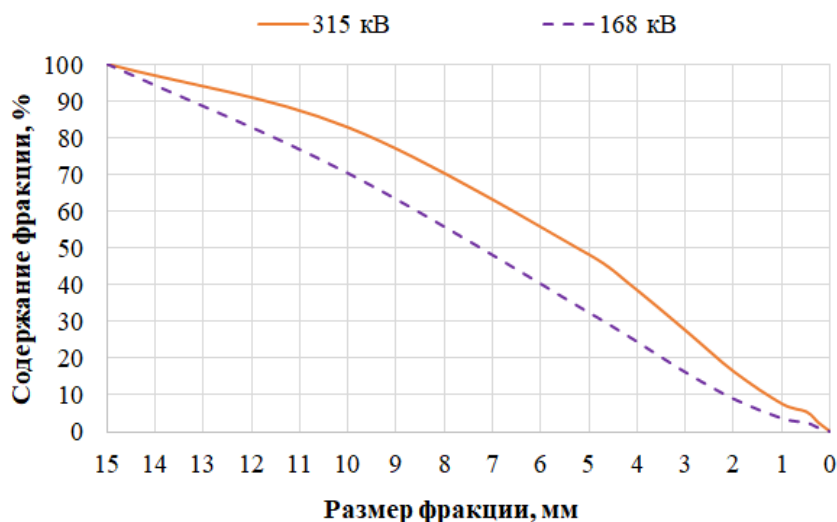


**Рис. 5.** Осциллограммы пробоя промежутка 50 мм в большой измельчительной камере с помощью ГИН 315/0,028 при 315 и 168 кВ: сплошная линия (красная) — напряжение; пунктирная линия (синяя) — ток  
**Fig. 5.** Oscillograms of 50 mm gap breakdown in large fragmenting vessel using PVG 315/0.028 at 315 and 168 kV: solid line (red) — voltage; dashed line (blue) — current

На рисунке 6 показаны кривые обратного кумулятивного распределения фракций продукта электроимпульсного дробления образцов кварца на сите с ячейками 15 мм, а в табл. 3 представлены некоторые показатели дробления. Как можно рассмотреть из рисунка, снижение напряжения воздействия ГИН привело к приближению фракционного распределения к более равномерному виду и повышению крупности конечного продукта: так, при уменьшении напряжения воздействия в 1,8 раза средняя крупность продукта дробления увеличилась практически на 25 %. Удельные энергозатраты на электроимпульсное разрушение образцов кварца № 1 и № 2 до размера менее 15 мм составили около 8 и 5 кВт·ч/т соответственно, что сравнимо с таковыми для абразивных материалов из электрокорунда (около 7 кВт·ч/т) [8]. Данное обстоятельство можно связать с малой прочностью кварца на разрыв, которая в десятки раз меньше его прочности на сжатие [9]. По этой же причине были получены довольно высокие степени дробления от 10 до 18 раз за стадию. Однако синтетический кварц также подчиняется общей тенденции увеличения энергоемкости разрушения с уменьшением размера измельчаемого материала из-за снижения вероятности внедрения разряда в частицы минерала. При переходе от сита с ячейками 15 мм на сито с ячейками 1 мм при неизменных энергетических параметрах воздействия энергоемкость разрушения для обоих уровней напряжения возросла в 9–11 раз. Но о высокой эффективности электроимпульсного разрушения говорит массовое содержание фракции менее 0,5 мм в продукте дробления после сита 1 мм, которое достигло 66 и 63 % для уровней напряжения 315 и 168 кВ соответственно.

Для опытов по дальнейшему электрогидравлическому измельчению и получению дополнительного выхода фракций кварца менее 0,5 мм использовались нераздробленный материал образца № 2 с сита 1 мм фракции  $-4,2 + 1$  мм и часть продукта дробления после данного сита фракции  $-1 + 0,5$  мм. Собранный материал был разделен на три навески с одинаковым фракционным распределением и массой по 320 г. Средняя крупность полученных навесок составила 1,35 мм.

На рисунке 7 изображены осциллограммы электрического пробоя при воздействии ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19 на промежуток 20 мм с навесками мелкозернистых фракций кварца в МИК. При работе обеих установок на навески было подано по 100 импульсов с суммарным энерговыделением 87,6 кДж. Развиваемый при разряде обоими генераторами ток достигал одной и той же максимальной величины в 14 кА, поскольку энергетические параметры схемы не изменились при переходе от ГИТ к ГИН. Однако можно заметить, что при разряде ГИН ток имеет вдвое большую скорость нарастания, что определяет высокую бризантность расширяющегося канала от воздействия ГИН 96/0,19.

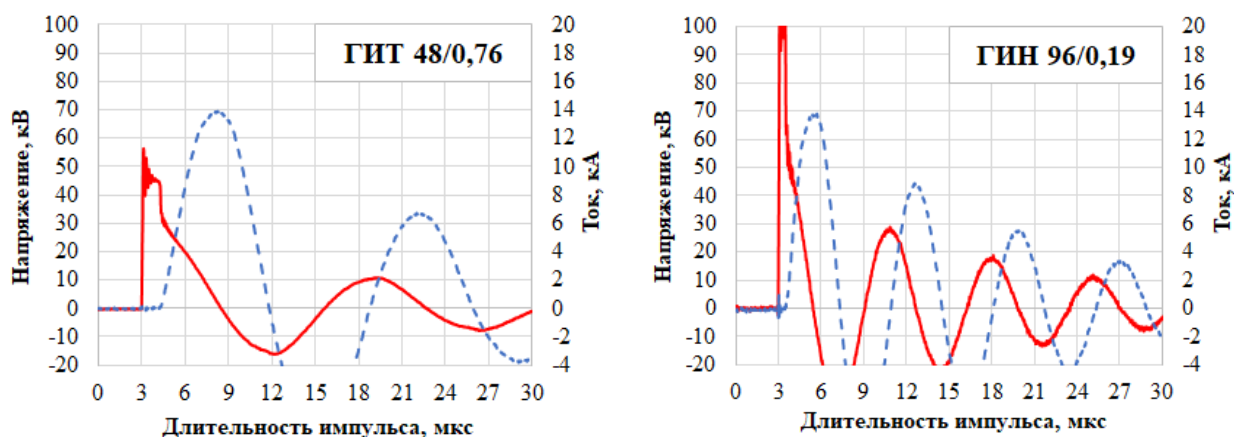


**Рис. 6.** Обратные кумулятивные фракционные распределения кварцевого продукта после дробления с помощью ГИН 315/0,028  
**Fig. 6.** Inverse cumulative particle size distributions of quartz product after crushing with PVG 315/0.028

Таблица 3

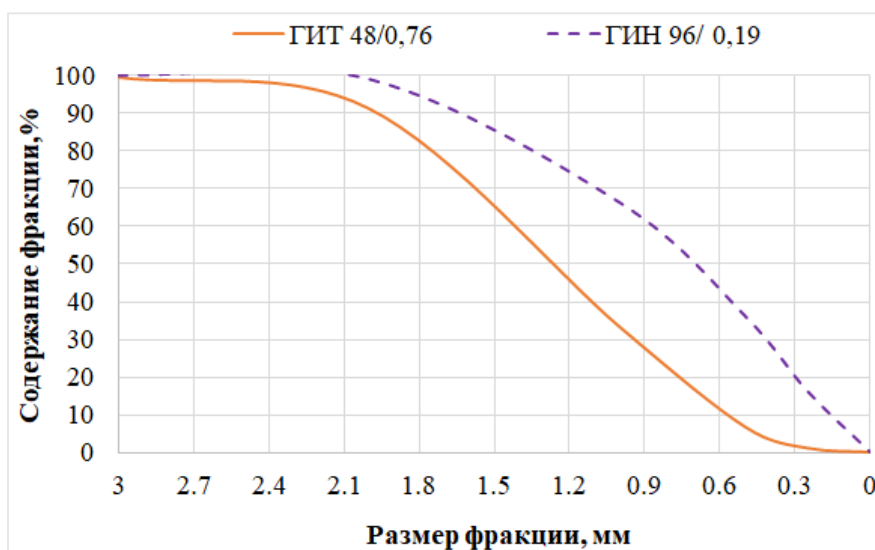
Показатели электроимпульсного дробления кристаллов кварца  
 Rates of electric pulse crushing of quartz crystals

Показатель	Образец № 1, 315 кВ		Образец № 2, 168кВ	
Размер ячеек сит, мм	15	1	15	1
Удельные энергозатраты, кВт·ч/т	7,7	65,6	5,2	55,9
Содержание фракции -0,5 мм в продукте, %	5,4	66,4	2,5	63,4
Степень дробления	12,5	15,8	10,0	18,1
Средний размер продукта, мм	6,01	0,41	7,48	0,43



**Рис. 7.** Осциллограммы пробоя промежутка 20 мм в малой измельчительной камере с помощью ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19: сплошная линия (красная) — напряжение; пунктирная линия (синяя) — ток  
**Fig. 7.** Oscillograms of the breakdown of a 20 mm gap in a small fragmenting vessel using PCG 48/0.76 and PVG 96/0.19: solid line (red) — voltage; dashed line (blue) — current

При одинаковых суммарных энергетических затратах, неизменяемой длине рабочего промежутка в МИК, энерговыкладе в импульсе, начальной крупности и массе навесок для измельчения воздействие ГИН 96/0,19 оказалось более эффективным в плане измельчения, чем разрушение с помощью ГИТ 48/0,76 (рис. 8 и табл. 4). Особенностью действия ГИТ явилось то, что продукт приобрел фракционное распределение, близкое к нормальному со средним значением крупности 1,31 мм, тогда как средняя крупность продукта после воздействия 2-ступенчатого ГИН оказалась на 36 % меньше. После подачи 100 импульсов от ГИН 96/0,19 на навеску кварца во фракцию менее 0,5 мм перешло 36 % массы материала, тогда как для ГИТ 48/0,76 этот показатель составил лишь около 7 %. Всё это говорит о лучшем распределении давления ударной волны при быстром энерговыкладе в канал разряда и более эффективной утилизации энергии разряда ГИН 96/0,19.



**Рис. 8.** Обратные кумулятивные фракционные распределения кварцевого продукта после измельчения ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19

**Fig. 8.** Inverse cumulative particle size distributions of quartz product after fragmenting with PCG 48/0.76 and PVG 96/0.19

*Таблица 4*

Показатели электрогидравлического разрушения кристаллов кварца  
Rates of electrohydraulic fracturing of quartz crystals

Показатель	ГИТ 48/0,76	ГИН 96/0,19
Удельные энергозатраты, кВт·ч/т	76	76
Содержание фракции <0,5 мм в продукте, %	6,7	36,2
Степень дробления	1,0	1,6
Средний размер продукта, мм	1,31	0,84

На рисунке 9 представлено изображение фракции <0,5 + 0,25 мм, выделенной из продукта измельчения после экспериментов с ГИН 96/0,19. Одной из особенностей электрогидравлического воздействия на кварц явилось то, что получаемые фрагменты малых фракций имеют округлую форму, и данный продукт может считаться окатанным кварцем, пригодным для производства стекла и керамики. Фрагменты тех же фракций после электроимпульсного воздействия чаще обладали пластинчатой и многоугольной формой, и такой кварц может быть использован в качестве абразивного материала.





**Рис. 9.** Фракция продукта измельчения кварца  $-0,5 + 0,25$  после экспериментов с ГИН 96/0,19  
**Fig. 9.** Fraction of quartz fragmenting product  $-0.5 + 0.25$  after experiments with PVG 96/0.19

### Заклучение

Исходя из литературных данных, при разрушении кристаллов кварца с помощью их непосредственного пробоя необходимо приложение достаточно высокого напряжения — порядка 300 кВ для образцов толщиной 45–50 мм — для создания сквозного канала разряда в них. Материал кварца, хотя и характеризуется высокой твердостью, является достаточно хрупким, что обуславливает его подверженность разрушению с распространением длинных и разветвленных трещин по всему объему при воздействии проходящей в его толще ударной волны от пробоя. По образованным дефектам уже может развиваться канал разряда при меньших напряжениях воздействия. Количество вложенной в канал энергии также влияет на степень разрушения крупных кристаллов, что связано с размером зоны первичного ударного воздействия вокруг канала и скоростью затухания распространяющейся в материале волны. Этими факторами объясняется увеличение крупности продукта измельчения при снижении выходного напряжения ГИН 315/0,028.

Однако по мере уменьшения крупности дробимых навесок кварца на степень измельчения уже начинает влиять не столько уровень напряжения и количество энергии, сколько скорость ее выделения, поскольку для мелких кристаллов вероятность внедрения разряда в их объем снижается, и ведущую роль в разрушении начинает играть ближайшая к каналу разряда зона ударного разрушения, что объясняет уменьшение крупности разрушенных кристаллов при переходе от ГИТ к ГИН в экспериментах по дроблению мелких фракций без удаления материала из зоны воздействия.

Опыты по изучению разрушения кварца при использовании электроимпульсного и электрогидравлического воздействия показали, что данные методы обладают довольно высокой эффективностью и имеют ряд достоинств по сравнению с традиционным механическим воздействием. Однако оптимизация процесса разрушения требует проведения дальнейших исследований.

### Список источников

1. О'Доноху М. Кварц: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 136 с.
2. Кусаинов К. Импульсные технологии и получение наноструктурированных материалов // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». 2010. № 4 (60). С. 24–30.
3. Electrical fragmentation as a novel route for the refinement of quartz raw materials for trace mineral impurities / E. D. Martello [et al.] // Powder Technology. 2012. V. 224. P. 209–216. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.02.055.
4. Лобанова Г. Л. Изменение свойств минералов при электроимпульсном разрушении // Физика горных пород и процессов. Сборник трудов. Томск: Издательство ТПИ, 1974. С. 41–45.
5. Potokin A. S. Effectiveness evaluating of the use electric pulse comminution method in combined technology of slag dump copper-nickel production refining // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress, Moscow, 17–21 сентября 2018 года. Moscow: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019. P. 2963–2968.
6. Потокин А. С., Климов А. А., Колобов В. В. Исследование горных пород с обогатительных комбинатов Мурманской области на лабораторном образце электроимпульсной дезинтеграционной установки // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 97–110. DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010.
7. Experimental and numerical study on the effect of electrohydraulic shock wave on concrete fracturing / Q. Yu [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 215, Part B. 110685. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110685.
8. Селиванов В. Н., Климов А. А. Разрушение твердых композиционных отходов импульсами высокого напряжения // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 79–86. DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.3.008.
9. Quartz Glass Property // (@MICQ) SHANGHAI WECHANCE INDUSTRIAL CO., LTD. Shanghai, 2010. URL: <https://www.micquartz.com/quartz-glass-property/> (дата обращения: 30.05.2024).

### References

1. O'Donoghue, M. *Kvarts* [Quartz]. Moscow, Mir, 1990, 136 p. (In Russ.).
2. Kusainov K. *Impul'snye tekhnologii i poluchenie nanostrukturirovannykh materialov* [Pulse technologies and production of nanostructured materials]. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya "Fizika"* [Bulletin of Karaganda University. Series "Physics"], 2010, no. 4 (60), pp. 24–30. (In Russ.)
3. Martello E. D., Bernardis S., Larsen R. B., Tranell G., Sabatino M. D., Arnberg L. Electrical fragmentation as a novel route for the refinement of quartz raw materials for trace mineral impurities. *Powder Technology*, 2012, Vol. 224, pp. 209–216. DOI:10.1016/j.powtec.2012.02.055.
4. Lobanova G. L. *Izmenenie svoystv mineralov pri elektroimpul'snom razrushenii* [Change of minerals properties at electric pulse destruction]. *Fizika gornyh porod i processov. Sbornik trudov* [Physics of Rocks and Processes. Collection of works]. Tomsk, TPI Publishing House, 1974, pp. 41–45. (In Russ.).
5. Potokin A. S. Effectiveness evaluating of the use electric pulse comminution method in combined technology of slag dump copper-nickel production refining. *IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress*, Moscow, September 17–21, 2018. Moscow, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019, pp. 2963–2968.
6. Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. *Issledovanie gornyh porod s obogatitel'nykh kombinatov Murmanskoy oblasti na laboratornom obrazce elektroimpul'snoy dezintegracionnoy ustanovki* [Research of rocks from mining plants of Murmansk region on a laboratory sample of electric pulse disintegration installation]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, vol. 13, no. 3, pp. 97–110. (In Russ.). DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010.

7. Yu Q., Zhang H., Yang R., Cai Z., Liu K. Experimental and numerical study on the effect of electrohydraulic shock wave on concrete fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, Vol. 215, Part B, 110685. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110685.
8. Selivanov V. N., Klimov A. A. *Razrushenie tvyordyh kompozicionnyh othodov impul'sami vysokogo napryazheniya* [Fracturing of solid composite waste with high voltage pulses]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, vol. 13, no. 3, pp. 79–86. (In Russ.). DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.3.008.
9. Quartz Glass Property. (@MICQ) SHANGHAI WECHANCE INDUSTRIAL CO., LTD. Shaghai, 2010. Available at: <https://www.micquartz.com/quartz-glass-property/> (accessed 30.05.2024).

#### ***Информация об авторах***

**А. А. Климов** — младший научный сотрудник;

**В. В. Колобов** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

**А. С. Потокин** — генеральный директор ООО «ТЕХЭДМ».

#### ***Information about the authors***

**A. A. Klimov** — Junior Researcher;

**V. V. Kolobov** — PhD (Engineering), Leading Researcher;

**A. S. Potokin** — General Director of LLC “TEHEDM”.

Статья поступила в редакцию 24.05.2024; одобрена после рецензирования 04.06.2024; принята к публикации 06.06.2024.  
The article was submitted 24.05.2024; approved after reviewing 04.06.2024; accepted for publication 06.06.2024.

Научная статья  
УДК 620.9  
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.010

## ПАМЯТИ БОРИСА ВАСИЛЬЕВИЧА ЕФИМОВА (18.05.1944 — 16.04.2023)

**Василий Николаевич Селиванов**

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

### Аннотация

Статья приурочена к 80-летию юбилею и годовщине смерти заслуженного энергетика Российской Федерации, заслуженного работника города Апатиты, профессора, доктора технических наук Бориса Васильевича Ефимова.

### Ключевые слова:

Ефимов Борис Васильевич, энергетика, электротехника, техника высоких напряжений

Original article

## IN MEMORY OF BORIS VASILYEVICH EFIMOV (18.05.1944 — 16.04.2023)

**Vasilii N. Selivanov**

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

### Abstract

The article is dedicated to the 80th anniversary and the anniversary of the death of Boris Vasilyevich Efimov, Honored Power Worker of the Russian Federation, Honored Worker of the city of Apatity, Professor, Doctor of Technical Sciences.

### Keywords:

Boris Vasilyevich Efimov, energy industry, electrical engineering, high voltage techniques



Ефимов Борис Васильевич  
Efimov Boris Vasilyevich

В 2024 г. исполнилось 80 лет со дня рождения Бориса Васильевича Ефимова, одного из инициаторов становления физико-технического направления электроэнергетических исследований в Кольском научном центре, и прошел один год со дня его кончины.

Борис Васильевич родился в Ленинграде 18 мая 1944 г. в семье служащих. Отец — Ефимов Василий Иванович (1897–1960), заместитель директора по эксплуатации автогрузового парка № 1 треста грузовых перевозок (Ленавтогужтранс), мать — Богданова Елизавета Павловна (1912–1977), инженер производственного объединения «Электросила».

В 1958 г. после окончания семи классов школы поступил на специальность «Электрические машины» в Ленинградский электромашиностроительный техникум (ЛЭМСТ) при заводе «Электросила». В 1962 г. с отличием окончил техникум со специальностью «техник-электрик» и в течение трех месяцев работал техником в Особом конструкторском бюро при заводе «Электросила» — Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры (НИИЭФА). В 1962 г. поступил в Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина (ЛПИ) на специальность «Электрофизика» по кафедре «Техника высоких напряжений» электромеханического факультета (ТВН). С четвертого курса был ленинским стипендиатом (стипендия имени В. И. Ленина учреждена Постановлением Совета Министров СССР № 371 от 31 марта 1960 года; в СССР студентам вузов выделялось ежегодно 2200 стипендий с ежемесячной выплатой 80 рублей). Являлся членом бюро комитета ВЛКСМ ЛПИ и редактором факультетской газеты «Электромеханик».

Летом 1966 г. в составе студенческого строительного отряда побывал в Чехословацкой Социалистической Республике.

В 1968 г. с отличием окончил институт с квалификацией «инженер-электрофизик» по специальности «Вакуумная техника электрофизических установок».

После окончания института девять месяцев работал конструктором лаборатории ТВН ЛПИ, в конце 1968 г. зачислен в аспирантуру ЛПИ на кафедру ТВН, а уже в декабре 1971 г. досрочно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы исследования переходных процессов в обмотках трансформаторов на цифровых вычислительных машинах» по специальности «05.052 — электрофизика» (научный руководитель — член-корреспондент АН СССР, доктор технических наук, профессор Михаил Васильевич Костенко, официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Камо Серопович Демирчян и кандидат технических наук, доцент Кира Пантелеймоновна Кадомская; ведущее предприятие — Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина).

С 1972 г. работал на кафедре ТВН ЛПИ в должностях младшего научного сотрудника (1972–1974 и 1977–1979), ассистента (1974–1977), старшего научного сотрудника (1979–1982). Его основным направлением работы в этот период являлись исследования импульсных процессов в высоковольтных устройствах, математическое моделирование развития перенапряжений в элементах энергосистем и систем связи. Исполнял обязанности заместителя научного руководителя лаборатории техники высоких напряжений им. А. А. Горева и председателя комиссии кафедры ТВН по работе с молодыми специалистами.

С октября 1976 г. по апрель 1977 г. проходил научную стажировку в Швейцарии на кафедре техники высоких напряжений Цюрихской высшей технической школы.

Еще в период работы в Ленинградском политехническом институте Борис Васильевич поддерживал отношения с коллегами из Отдела энергетики Кольского филиала АН СССР (КФАН СССР) — выпускниками ЛПИ. Необходимо упомянуть, что в Отделе энергетики работы по электротехнической и электрофизической тематике ранее не проводились. Специалистов данного профиля не было до 1975 г., когда на должность стажера-исследователя был принят Юрий Масумович Невретдинов, окончивший в этом году электромеханический факультет ЛПИ по кафедре «Техника высоких напряжений» со специальностью «инженер-электрофизик». Являясь начинающим специалистом в области грозозащиты, уже в 1976 г. инженер Ю. М. Невретдинов в качестве ответственного исполнителя активно включился в работу над новым для Отдела

вопросом «Исследование и разработка методов грозозащиты высоковольтных сетей в условиях Кольского полуострова». В 1977 г. Юрий Масумович поступил в целевую аспирантуру ЛПИ на кафедру ТВН, где среди его коллег и научных наставников был и Борис Васильевич Ефимов.

К моменту перевода в Отдел энергетики КФАН СССР Борис Васильевич Ефимов уже являлся ведущим специалистом в области применения ЭВМ для расчетов импульсных процессов в широком классе высоковольтных электроэнергетических и электрофизических устройств. Им и под его руководством впервые были решены в уточненной постановке задачи расчетов переходных процессов в системах, содержащих сосредоточенные и распределенные параметры, зависящие от напряжения и частоты. Результаты работ были внедрены во многих проектных и научно-исследовательских организациях. Им лично и в соавторстве к 1982 г. было опубликовано около 40 печатных научных работ, в том числе 8 статей в ведущих научных и производственно-технических журналах СССР [1–8] и одна монография [9].

Близкое знакомство выпускников ЛПИ вылилось в выполнение совместных работ по исследованию грозозащиты высоковольтных сетей и подготовке проекта изменения действующих норм по грозозащите. Были опубликованы совместные статьи [5] и монография [9]. Между Отделом энергетики и кафедрой ТВН ЛПИ был заключен договор о научно-техническом сотрудничестве.

В апреле 1980 г. Борис Васильевич был в командировке в г. Апатиты с целью проведения совместных работ с сотрудниками Отдела энергетики КФАН СССР и обсуждения с руководством условий трудоустройства. В 1981 г. временно работал старшим научным сотрудником в Отделе энергетики, и тогда же было принято решение о приглашении его на должность старшего научного сотрудника.

Приказом № 46-к от 12 января 1982 г. за подписью Председателя Президиума Ордена Ленина Кольского филиала Академии наук СССР им. С. М. Кирова члена-корреспондента Г. И. Горбунова Борис Васильевич Ефимов был по приглашению принят на должность исполняющего обязанности старшего научного сотрудника.

На новом месте работы Борис Васильевич продолжил экспериментальные и численные исследования атмосферных перенапряжений в линиях электропередачи и кабелях связи. Он разработал новую математическую модель и уточненный алгоритм расчета надежности грозозащиты ЛЭП. Созданная им программа для ЭВМ была внедрена институтом «Энергосетьпроект». Под его руководством проведены работы по уникальному для Крайнего Севера экспериментальному исследованию в полевых условиях импульсных процессов в многопроводных подземных линиях. Интерпретация результатов этих исследований позволила существенно уточнить физическую картину явления, а полученные данные использованы при разработке в ЛПИ уточненных методов анализа грозостойкости кабелей.

Примечательно, что именно в 1982 г. в Отделе энергетики произошли значительные структурные и кадровые изменения. В соответствии с рекомендациями комиссии Отделения физико-технических проблем энергетики АН СССР (ОФТПЭ РАН) решениями Президиума Кольского филиала АН СССР от 17.06.1982 и 18.10.1982 в составе Отдела создано три лаборатории:

- лаборатория комплексных проблем энергетики Севера № 21 (заведующим лабораторией назначен доктор технических наук, профессор Игорь Родионович Степанов);
- лаборатория комплексных электрофизических и электроэнергетических проблем № 22 (заведующий лабораторией — кандидат технических наук Анатолий Федорович Усов);
- лаборатория атомной энергетики № 23 (заведующий лабораторией — кандидат физико-математических наук Вадим Алексеевич Наумов). Лаборатория была исключена из структуры Отдела в 1988 г. в связи с переводом в структуру Горного института КФАН СССР.

Научным ядром лаборатории комплексных электрофизических и электроэнергетических проблем стали сотрудники Отдела: кандидаты технических наук Игорь Матвеевич Зархи, Борис Васильевич Ефимов, Юрий Масумович Невретдинов, а также переведенные из лаборатории электрофизических методов разрушения горных пород Горного института КФАН СССР

кандидат технических наук Анатолий Федорович Усов и младший научный сотрудник Аркадий Николаевич Данилин. В инженерно-технический состав лаборатории вошли инженеры Лидия Филипповна Губнелова и Евгений Петрович Петров, стажер-исследователь Юрий Михайлович Дергаев.

В первый же год работы Борис Васильевич руководил совместной с ЛПИ работой «Исследование грозозащиты подземных кабельных линий с дискретными неоднородностями по длине» (ответственный исполнитель — младший научный сотрудник А. Н. Данилин).

В 1983–1985 гг. Б. В. Ефимов являлся научным руководителем раздела плановой темы «Исследование атмосферных перенапряжений в магистральных кабелях связи». Сверх плана руководил работами по хозяйственным договорам с РЭУ «Колэнерго». По заказу института «Ленгидропроект» занимался повышением надежности работы систем связи в дамбе, защищающей Ленинград от наводнений.

Результаты исследований докладывались на заседаниях Научных Советов СССР, всесоюзных и республиканских конференциях, международной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакций.

Являлся членом IV секции Научного совета АН СССР по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электроэнергетики», членом Совета по автоматизации научных исследований при Президиуме КФАН СССР, членом Ученого совета Отдела энергетики. Активно участвовал в общественной работе, являясь членом поста народного контроля, профкома и добровольной народной дружины Отдела, а также редактором стенгазеты «Энергия».

В 1986–1990 гг. Б. В. Ефимов был ответственным исполнителем научной темы «Исследование воздействий электромагнитных полей на элементы энергосистем и системы проводной связи и разработка защитных мероприятий». Под его руководством разработаны уточненная методика грозозащиты ЛЭП, а также предложения по совершенствованию грозозащиты ЛЭП и подстанций для районов с высоким удельным сопротивлением грунта. Материалы работ включены в проект «Руководящие указания по защите электрических сетей 6–1150 кВ от перенапряжений».

20 января 1987 г. Борис Васильевич был переведен на должность ведущего научного сотрудника лаборатории № 22 Отдела энергетики. 23 ноября 1987 г. Постановлением Президиума АН СССР № 1020-331-11000 ему было присвоено ученое звание старшего научного сотрудника по специальности 05.14.12 «Техника высоких напряжений».

В 1990 г. в районе г. Мончегорска совместно с ПО «Колэнерго» запущен в эксплуатацию научно-исследовательский полигон напряжением до 2 миллионов вольт, предназначенный для экспериментальных исследований в области высоковольтной электроэнергетики. Экспериментально подтверждены уникальные характеристики линии электропередачи специальной конструкции, позволяющие генерировать перенапряжения в воздушных и подземных элементах энергосистем во всем диапазоне параметров реальных грозовых разрядов, что существенно повышает степень достоверности рекомендаций по снижению аварийности электрооборудования в грозовой период. Под руководством Б. В. Ефимова на полигоне были проведены экспериментальные исследования надежности работы перспективных конструкций ЛЭП и новых способов ограничения перенапряжений на линиях.

На основе экспериментальных данных и развития теории многопроводных линий с переменными параметрами Борис Васильевич создал новые математические модели и алгоритмы расчета надежности грозозащиты ЛЭП и кабелей. Разработанные им программы для ЭВМ внедрялись в научно-исследовательских и проектных организациях СССР. По результатам многолетних исследований совместно с сотрудниками ЛПИ издана монография [10].

Постановлением Президиума АН СССР № 1153 от 18.08.1990 г. и Приказом по Кольскому научному центру № 1451-к от 14.11.1990 г. на базе Отдела энергетики был образован Институт физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра АН СССР.

Среди основных направлений научных исследований Института было определено изучение проблем надежного и эффективного электроснабжения потребителей в специфических условиях Севера и применения электроэнергии в технологиях добычи и переработки минерального сырья. В 1991 г. в структуре Института был создан Отдел электрофизики № 30 под руководством кандидата технических наук И. М. Зархи. В Отдел вошли три лаборатории: лаборатория перенапряжений и изоляции № 31 (заведующий лабораторией — кандидат технических наук И. М. Зархи); лаборатория электрофизических технологий № 32 (заведующий лабораторией — кандидат технических наук — А. Ф. Усов (ликвидирована в 1992 г. в связи с прекращением работ по теме)); высоковольтная испытательная лаборатория № 33 (заведующий лабораторией — А. Н. Данилин).

Создание и становление Института совпало с тяжелейшим экономическим кризисом в России. Недостаточное финансирование привело к сокращению лабораторий и целых научных направлений, а вследствие оттока кадров численность работников Института сократилась с 62 человек в 1991 г. до 36 в 1999 г.

Тем не менее совместными усилиями сотрудников Отдела электрофизики и при поддержке ОФТПЭ РАН удалось сохранить электротехническое направление в Институте. Были активизированы усилия по привлечению внебюджетных средств: число одновременно выполняемых хозяйственных договоров в отдельные годы превышало 10, а доля внебюджетного финансирования в среднем составляла 25 %, а в 1995 г. , например, превысила 40 %. Основными заказчиками работ были АО «Колэнерго» и Кольская АЭС (КАЭС).

В период с 1991 по 2002 г. при участии и под руководством Бориса Васильевича был выполнен цикл комплексных научно-исследовательских работ, направленных на повышение надежности работы электроэнергетических систем в условиях увеличения доли стареющего оборудования.

Разработана новая методика, алгоритм и программа расчета вероятного числа отключений линий передачи по грозовым причинам с учетом специфических условий северных регионов. Результаты разработки включены в «Руководящие указания по защите от перенапряжений сетей 3–1150 кВ Минэнерго СССР» (раздел 2.14) и используются при эксплуатации электрических сетей.

Создан научно-исследовательский лабораторный комплекс для импульсных испытаний на грозостойкость проводов и грозозащитных тросов ЛЭП, а также линий волоконно-оптической связи, размещенных на тросах ЛЭП, позволяющий впервые в стране моделировать одновременное развитие основных стадий тока линии. Получены новые теоретические и экспериментальные данные, позволяющие оптимизировать конструкции и параметры таких линий и решать ряд актуальных задач по обеспечению высокой надежности связи по воздушным оптико-волоконным линиям с металлической несущей частью.

Исследованы перенапряжения в сети 6–330 кВ КАЭС и разработаны средства защиты электрооборудования. Дан полный анализ характера, причин возникновения и средств борьбы с перенапряжениями на КАЭС, а также рекомендации по совершенствованию защитных аппаратов и мест их установки. Разработанные рекомендации значительно повысили надежность эксплуатации ответственного оборудования КАЭС.

Создан комплекс справочных и информационно-аналитических компьютерных систем по характеристикам, текущему состоянию, авариям и отказам высоковольтного оборудования, позволяющий повысить надежность эксплуатации электрических сетей 35–330 кВ и обеспечить снижение аварийности в высоковольтных сетях АО «Колэнерго».

Разработана аналитическая теория распространения волн атмосферных перенапряжений в воздушных линиях электропередачи традиционного исполнения при произвольном числе коронирующих проводов. Созданы алгоритмы и разработан комплекс программ для решения систем телеграфных дифференциальных уравнений с учетом нелинейных характеристик поперечных проводимостей линии.



Разработан комплекс алгоритмов, программ и электротехнических устройств, повышающих надежность работы компьютерных систем управления энергосистемами, находящихся в зоне сильных магнитных полей.

Выполнено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование возникновения и развития феррорезонансных явлений в высоковольтных сетях 6–330 кВ как наиболее опасного вида длительных внутренних перенапряжений и токовых перегрузок подстанционного оборудования. Предложена и реализуется система защитных мероприятий, позволяющая исключить феррорезонансные явления во всей высоковольтной сети АО «Колэнерго».

Кризисная финансовая и кадровая ситуация в Институте стимулировала Бориса Васильевича к повышению научного и административного статуса. В 1999 г. в Санкт-Петербургском государственном техническом университете он успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности «05.14.12 — техника высоких напряжений» на тему «Методы исследования развития атмосферных перенапряжений в высоковольтных линиях энергосистем Севера и разработка комплекса мер по повышению надежности их работы». Официальными оппонентами были академик РАН, доктор технических наук, профессор Николай Николаевич Тиходеев, доктор технических наук, профессор Кира Пантелеймоновна Кадомская, доктор технических наук, профессор Николай Владимирович Коровкин. Ведущая организация — СЗИ «Энергосетьпроект». Результаты диссертационной работы были обобщены в монографии [11]. Полный список научных работ Бориса Васильевича за период его деятельности в Кольском научном центре можно посмотреть в библиографическом указателе [12].

В 1999 г. он единогласно избран членом-корреспондентом Академии электротехнических наук РФ.

В 1998 г. Б. В. Ефимов был назначен исполняющим обязанности, а в 1999 г. назначен на должность заместителя директора по науке Института физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН.

Постановлением Президиума РАН № 182 от 27.06.2000 г. и Приказом Председателя Президиума КНЦ РАН № 212 от 17.07.2000 г. Борис Васильевич Ефимов утвержден в должности директора Института физико-технических проблем энергетики Севера, будучи избранным на эту должность Общим собранием ОФТПЭ РАН.

Обязанности директора нашей организации Борис Васильевич исполнял в течение 18 лет до 2018 г. — дольше, чем все другие руководители. За этот период Институт (а впоследствии Центр) физико-технических проблем энергетики Севера стал стабильно и успешно функционирующим научным подразделением Кольского научного центра, несмотря на продолжающееся реформирование российской науки. В 2004 г. в связи с необходимостью уменьшения числа бюджетополучателей в КНЦ РАН Институт физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН был присоединен к Кольскому научному центру РАН в качестве филиала КНЦ РАН — Центра физико-технических проблем энергетики Севера (ЦФТПЭС КНЦ РАН) и перестал быть самостоятельным юридическим лицом. В этом же году Борис Васильевич был назначен на должность заместителя председателя Президиума КНЦ РАН по научной работе, исполняя при этом обязанности директора ЦФТПЭС КНЦ РАН по совместительству.

Несмотря на сильную загруженность на руководящей должности в Президиуме КНЦ РАН, Борис Васильевич принимал непосредственное участие в большинстве научно-исследовательских работ (НИР) Центра энергетики, с 2002 г. являясь научным руководителем всех тем плана НИР по направлению высоковольтной электроэнергетики и электротехники.

В период с 2002 по 2018 г. Центр сосредоточил усилия в области исследования комплексных физико-технических проблем надежности эксплуатации и использования высоковольтного оборудования энергосистем с учетом процессов его старения и повышения требований к электромагнитной совместимости.

Выполнен цикл теоретических и экспериментальных исследований электромагнитной совместимости высоковольтных энергетических сетей с техносферой и биосферой в условиях роста доли оборудования, выработавшего плановый ресурс, повышения требований к безопасности работы персонала энергосистем и снижения уровней допустимых напряженностей электрических и магнитных полей для населения.

Проведены комплексные исследования влияния железнодорожных тяговых сетей на переменном токе на линии электропередач энергосистемы, позволившие определить распределение обратных токов между рельсовыми путями и землей, зависящее от электрических параметров грунта. Выполненные измерения позволили разработать математическую модель электромагнитной связи контуров токов железной дороги и высоковольтных линий, определить уровень наведенных напряжений на линиях и разработать рекомендации по защите персонала энергосистемы, производящего ремонты на линиях.

Завершен цикл экспериментальных и теоретических работ по научно-методическому обоснованию направлений совершенствования нормативной базы по защите оборудования высоковольтных подстанций энергосистем от атмосферных перенапряжений в специфических климатических и грунтовых условиях Крайнего Севера России.

Развита теория распространения грозовых перенапряжений в схемах замещения многопроводных линий и подстанций с учетом импульсных входных сопротивлений заземлений защитных устройств. Выполнено экспериментальное и численное исследование формирования атмосферных перенапряжений на основном оборудовании, установленном на подстанциях, расположенных в специфических условиях Крайнего Севера. Оценены показатели грозоупорности электроэнергетического оборудования с учетом всех основных влияющих факторов.

Впервые проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования развития атмосферных перенапряжений на шинах и заземляющем устройстве действующей подстанции 330 кВ при набегании электромагнитного импульса с линии электропередачи. Полученные результаты доказывают необходимость учета импульсных характеристик сопротивления заземления защитных аппаратов при анализе надежности грозозащиты подстанционного оборудования в условиях высокого удельного сопротивления грунта. Показано, что действующие нормативные документы по грозозащите подстанций от волн, набегающих с линий электропередачи, нуждаются в существенной переработке.

Выполнена важная для Кольского и Карельского регионов работа по экспертизе необходимости продления сроков эксплуатации блоков Кольской АЭС по критериям надежности электроснабжения этих регионов.

За более чем 55 лет своей научной деятельности Б. В. Ефимов опубликовал свыше 200 научных трудов, в том числе 10 монографий и учебно-методических изданий. Руководил 10 грантами Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

С декабря 2018 г. и до последнего своего дня Борис Васильевич являлся руководителем научной тематики ЦЭС КНЦ РАН в должности главного научного сотрудника.

Кроме основной работы в КНЦ РАН, Борис Васильевич активно участвовал в организации кафедры электроэнергетики и электротехники и подготовке студентов по специальности «Высоковольтные электроэнергетика и электротехника» в Кольском филиале Петрозаводского государственного университета (КФ ПетрГУ).

Он руководил разработкой учебных программ по ряду специальных дисциплин, учитывающих специфику регионов Крайнего Севера, в том числе по электромагнитной совместимости, молниезащите, перенапряжениям в электроэнергетических устройствах и др.; читал лекционные курсы по теоретическим основам электротехники и переходным процессам в электротехнических устройствах; руководил курсовыми и дипломными работами студентов; участвовал в работе государственных экзаменационных и аттестационных комиссий по проведению государственных экзаменов и защите дипломных проектов; являлся членом Ученого совета КФ ПетрГУ.

С 2008 г. являлся заведующим кафедрой электроэнергетики и электротехники физико-энергетического факультета КФ ПетрГУ. В настоящее время коллектив Центра физико-технических проблем энергетики Севера (ЦЭС КНЦ РАН) более чем на 50 % состоит из выпускников этой кафедры.

В 2004 г. Б. В. Ефимов организовал базовую кафедру «Высоковольтная электроэнергетика и электротехника» в Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН. В рамках деятельности базовой кафедры была создана высоковольтная научно-учебная лаборатория, в которой выполнялись циклы лабораторных работ, научные исследования студентами и аспирантами электроэнергетического профиля.

В 2009 г. Борису Васильевичу Ефимову было присвоено ученое звание профессора по кафедре электроэнергетики и электротехники.

Борис Васильевич также вел активную работу по подготовке специалистов высшей квалификации. Он являлся членом Диссертационного совета Д 212 229.11 при Санкт-Петербургском государственном политехническом институте. За свою жизнь в качестве научного консультанта и руководителя он подготовил к защите диссертаций на степень кандидата технических наук Натэllu Идрисовну Гумерову (1974), Юрия Петровича Кубарькова (1976), Валентина Михайловича Ртищева (1978), Александра Валерьяновича Покровского (1979), Аркадия Николаевича Данилина (1990), Василия Николаевича Селиванова (2004), Марину Викторовну Якубович (2007), Виталия Валентиновича Колобова (2008), Алексея Сергеевича Карпова (2010), Ольгу Валерьевну Залесову (2017), Дмитрия Владимировича Куклина (2017).

Указом Президента РФ № 494 от 20.04.2010 за заслуги в области совершенствования энергетического комплекса и многолетнюю плодотворную работу директору Центра Борису Васильевичу Ефимову присвоено почетное звание «Заслуженный энергетик РФ».

Родившийся и половину жизни проживший в Ленинграде, Борис Васильевич второй родиной по праву считал Мурманскую область и город Апатиты. Вся его научная и педагогическая деятельность была направлена на совершенствование энергетического комплекса Мурманской области и развитие его кадрового потенциала. Он входил в состав рабочей группы по разработке долгосрочной целевой программы комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры муниципального образования города Апатиты, в комиссию по реализации Стратегии экономического развития Мурманской области и в комиссию по развитию топливно-энергетического комплекса при губернаторе Мурманской области. За заслуги перед Мурманской областью и г. Апатиты Борис Васильевич неоднократно отмечался благодарностями и грамотами органов власти. В 2021 г. решением Совета депутатов города Апатиты Борису Васильевичу Ефимову присвоено почетное звание «Заслуженный работник города Апатиты».

Имя Бориса Васильевича широко известно в кругу специалистов в области техники высоких напряжений, грозозащиты линий и подстанций, исследования перенапряжений в элементах электрических сетей и электромагнитной совместимости.

Борис Васильевич являлся не только научным руководителем, но и учителем большей части коллектива ЦЭС КНЦ РАН. Все кандидаты наук, защитившиеся по электрофизическому направлению, готовили свои квалификационные работы под его руководством, поэтому именно ему наш коллектив обязан всеми научными достижениями последних десятилетий. Светлая память о Борисе Васильевиче Ефимове навсегда сохранится в наших сердцах.

#### **Список источников**

1. Анализ грозозащиты подстанций от набегающих волн атмосферных перенапряжений с помощью ЦВМ «Проминь» / В. Г. Гольдштейн, Б. В. Ефимов, А. В. Некрасов, Н. В. Цимерская // Электрические станции. 1970. № 4. С. 79.
2. Ефимов Б. В., Люлько В. А., Мамонова О. М. Метод расчета распределения импульсных потенциалов в обмотках вращающихся машин по частотным характеристикам входных проводимостей // Электричество. 1973. № 8. С. 58–61.

3. Численный анализ процессов формирования интенсивного электронного пучка наносекундной длительности в сильноточных ускорителях / Г. Р. Заблочкая, А. А. Дроздов, Б. В. Ефимов, Ю. П. Кубарьков // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 19, № 1. С. 11–14.
4. Исследование формирования мощного релятивистского электронного пучка / Г. Р. Заблочкая, Л. В. Дубовой, Б. В. Ефимов, А. А. Дроздов, Ю. П. Кубарьков // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 20, № 2. С. 50–57.
5. Исследование эффективности противовесов в грозозащите подстанций при высоком удельном сопротивлении грунта / Б. В. Ефимов [и др.] // Электрические станции. 1980. № 4. С. 54–57.
6. Гумерова Н. И., Ефимов Б. В., Костенко М. В. Расчет деформации волн атмосферных перенапряжений в линиях передач // Электричество. 1980. № 6. С. 58–61.
7. Емкостные накопители как источник энергии для целей управляемого термоядерного синтеза / Б. В. Ефимов [и др.] // Электротехника. 1980. № 1.
8. Исследование нестационарных процессов в водяных формирующих линиях / В. В. Еремкин, Б. В. Ефимов, П. Г. Попов, Г. А. Шнейерсон // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 1. С. 97–101.
9. Анализ надежности грозозащиты подстанций / М. В. Костенко, Б. В. Ефимов, И. М. Зархи, Н. И. Гумерова; отв. ред. И. Р. Степанов. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1981. 127 с.
10. Волновые процессы и перенапряжения в подземных проводниках / М. В. Костенко, Н. И. Гумерова, А. Н. Данилин, Б. В. Ефимов, В. В. Потапов, А. А. Смирнов. СПб.: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
11. Ефимов Б. В. Грозовые волны в воздушных линиях. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2000. 134 с.
12. Библиографический указатель изданий Центра физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН (1957–2022) / составители: В. В. Ивонин, Н. М. Кузнецов; отв. ред. В. Н. Селиванов. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2023. 179 с.

## References

1. Gol'dshteyn V. G., Efimov B. V., Nekrasov A. V., Tsimerskaya N. V. Analiz grozozashchity podstantsiy ot nabegayushchih voln atmosferynh perenapryazheniy s pomoshch'yu TsVM "Promin" [Analysis of lightning protection of substations from incoming waves of atmospheric overvoltages using the Promin digital computer]. *Elektricheskie stantsii* [Electrical Stations], 1970, No 4, p. 79. (In Russ.).
2. Efimov B. V., Lyul'ko V. A., Mamonova O. M. Metod raschyota raspredeleniya impul'snykh potentsialov v obmotkakh vrashchayushchihsya mashin po chastotnym harakteristikam vhodnykh provodimostey [Method for calculating the distribution of pulse potentials in the windings of rotating machines based on the frequency characteristics of the input conductivities]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1973, No 8, pp. 58–61. (In Russ.).
3. Zablotskaya G. R., Drozdov A. A., Efimov B. V., Kubar'kov Yu. P. Chislennyy analiz protsessov formirovaniya intensivnogo elektronnoy puchka nanosekundnoy dlitel'nosti v sil'notochnykh uskoritelyah [Numerical analysis of the processes of formation of an intense electron beam of nanosecond duration in high-current accelerators]. *Pis'ma v ZhTF* [Technical Physics Letters], 1975, Vol. 19, No 1, pp. 11–14. (In Russ.).
4. Zablotskaya G. R., Dubovoy L. V., Efimov B. V., Drozdov A. A., Kubar'kov Yu. P. Issledovanie formirovaniya moshchnogo relyativistskogo elektronnoy puchka [Study of the formation of a powerful relativistic electron beam]. *Pis'ma v ZhTF* [Technical Physics Letters], 1976, Vol. 20, No 2, pp. 50–57. (In Russ.).
5. Efimov B. V., Zarhi I. M., Zotov E. V., Nevretdinov Yu. M., Pokrovskiy A. V., Halilov F. H. Issledovanie effektivnosti protivovesov v grozozashchite podstantsiy pri vysokom udel'nom soprotivlenii grunta [Study of the effectiveness of counterweights in lightning protection of substations with high soil resistivity]. *Elektricheskie stantsii* [Electrical Stations], 1980, No 4, pp. 54–57. (In Russ.).

6. Gumerova N. I., Efimov B. V., Kostenko M. V. Raschyot deformatsii voln atmosferykh perenapryazheniy v liniyah peredach [Calculation of deformation of atmospheric surge waves in transmission lines]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1980, No 6, pp. 58–61. (In Russ.).
7. Efimov B. V., Zayents S. L., Kichaeva G. S., Kostenko M. V., Kuchinskiy G. S., Popova V. A., Shilin O. V., Shkuropat P. I., Shneerson G. A., Shutov V. L. Yomkostnye nakopiteli kak istochnik energii dlya tseley upravlyaemogo termoyadernogo sinteza [Capacitive storage devices as an energy source for controlled thermonuclear fusion purposes]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 1980, No 1. (In Russ.).
8. Eremkin V. V., Efimov B. V., Popov P. G., Shneerson G. A. Issledovanie nestatsionarnykh protsessov v vodyanykh formiruyushchikh liniyah [Study of non-stationary processes in water forming lines]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Energy and Transport], 1982, No 1, pp. 97–101. (In Russ.).
9. Kostenko M. V., Efimov B. V., Zarhi I. M., Gumerova N. I. *Analiz nadyozhnosti grozozashchity podstantsiy* [Analysis of the reliability of lightning protection of substations]. Leningrad, Nauka, Leningrad Branch, 1981, 127 p. (In Russ.).
10. Kostenko M. V., Gumerova N. I., Danilin A. N., Efimov B. V., Potapov V. V., Smirnov A. A. *Volnovye protsessy i perenapryazheniya v podzemnykh provodnikakh* [Wave processes and overvoltages in underground conductors]. Saint Petersburg, Energoatomizdat, 1991, 232 p. (In Russ.).
11. Efimov B. V. *Grozovye volny v vozdushnykh liniyah* [Lightning waves in overhead lines]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2000, 134 p. (In Russ.).
12. *Bibliograficheskiy ukazatel' izdaniy Tsentra fiziko-tekhnicheskikh problem energetiki Severa FITs KNTs RAN (1957–2022)* [Bibliographic index of publications of the Center for Physical and Technical Problems of Northern Energy, FRC KSC RAS (1957–2022)], compiled by V. V. Ivonin, N. M. Kuznetsov. Apatity, Publ. KSC RAS, 2023, 179 p. (In Russ.).

#### **Информация об авторе**

**В. Н. Селиванов** — кандидат технических наук, директор.

#### **Information about the author**

**V. N. Selivanov** — PhD (Engineering), Director.

Статья поступила в редакцию 24.05.2024; одобрена после рецензирования 04.06.2024; принята к публикации 06.06.2024.  
The article was submitted 24.05.2024; approved after reviewing 04.06.2024; accepted for publication 06.06.2024.

