



УДК 911.3:33

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-1-5-17

Территориальная организация энергосистемы Чукотского автономного округа

Атаев З.А.

Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина,
Россия, 390000, г. Рязань, ул. Свободы, 46
E-mail: ataev-rzn@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности изоляции энергетического пространства Чукотского автономного округа. Объектом исследования является территориальная организация региональной энергосистемы. Виток инвестиционного интереса к стратегическим ресурсам полезных ископаемых Чукотки лимитирован энергетической изоляцией. Для нейтрализации разных уровней изоляции предложена модель разномасштабной энергосистемы. Внешняя изоляция будет ликвидирована в случае объединения с энергосистемой Магаданской области (вертикаль централизации). По горизонтали энергетического пространства востребовано объединение изолированных сегментов энергосистемы (наращивание питающей сети). В районах децентрализованного электроснабжения перспективно комбинирование автономной дизельной генерации с энергоустановками на основе возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: Чукотский автономный округ, энергетическое пространство, надежность электроснабжения, изолированная энергосистема, централизованное и децентрализованное электроснабжение

Для цитирования: Атаев З.А. 2024. Территориальная организация энергосистемы Чукотского автономного округа. Региональные геосистемы, 48(1): 5–17. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-5-17

Territorial Organization of the Energy System of the Chukotka Autonomous Okrug

Zairbeg A. Ataev

Ryazan State University named after S.A. Yesenin,
46 Svobody St, Ryazan 390000, Russia
E-mail: ataev-rzn@yandex.ru

Abstract. Technical and economic approaches poorly take into account the role of morphology in the optimization of complex systems. The purpose of the work is to analyze the territorial organization of the energy space of Chukotka. The object of the study is the energy system of the Chukotka Autonomous Okrug. A system-structural analysis of the energy space was carried out. The dependence of the morphology of the power system on the localization of the mining industry, the pattern of settlement and marine communications is revealed. The round of interest in the promising resources of the region is limited by transport and energy isolation. A model of the energy space of Chukotka (multi-scale systems) is proposed. The elimination of regional isolation is possible with the construction of the Kolyma–Anadyr federal road and the trunk network. Horizontally, connectivity between isolated parts of the system is in demand due to the expansion of the network. At the local level, the combination of diesel generation with power plants based on renewable energy sources is promising.

Keywords: Chukotka Autonomous Okrug, energy space, reliability of power supply, isolated power system, centralized and decentralized power supply.

For citation: Ataev Z.A. 2024. Territorial Organization of the Energy System of the Chukotka Autonomous Okrug. Regional Geosystems, 48(1): 5–17 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-5-17



Введение

По территориально-технологическим и экономическим причинам четыре субъекта страны изолированы от Единой энергосистемы России: Камчатский край, Чукотский автономный округ, Сахалинская и Магаданская области [ГОСТ Р 57114-2016; Системный оператор..., 2021]. Такая ситуация характерна и большей части Республики Саха (Якутия) [Волотковская и др., 2021]. Это огромные труднодоступные территории с экстремальными природно-климатическими условиями и очаговым расселением. Особенно специфичны энергосистемы Арктической зоны [Моргунова, Цуневский, 2012]. Среди них выделяется своей уникальностью энергетическое пространство Чукотского автономного округа.

Исследования электроэнергетики Чукотки представлены широко, доминируют работы с акцентом на аспекты региональной энергосистемы (энергетика, экономика, коммуникации, логистика) [Байков и др., 2015; Панин и др., 2016; Бердин и др., 2017; Санеев и др., 2018; Иванов и др., 2021; Санеев и др., 2021; и др.]. Практически во всех источниках большое внимание уделяется развитию возобновляемой энергетики (особенно на основе высокого ветроэнергетического потенциала территории).

Из анализа работ вытекает, что энергосистема – это сфера интересов экономистов, энергетиков и управленцев. Морфологический аспект связности и надежности энергосистемы не нашел должного отражения. Отсюда цель представленной работы – оптимизация энергетического пространства Чукотского автономного округа.

Объекты и методы исследования

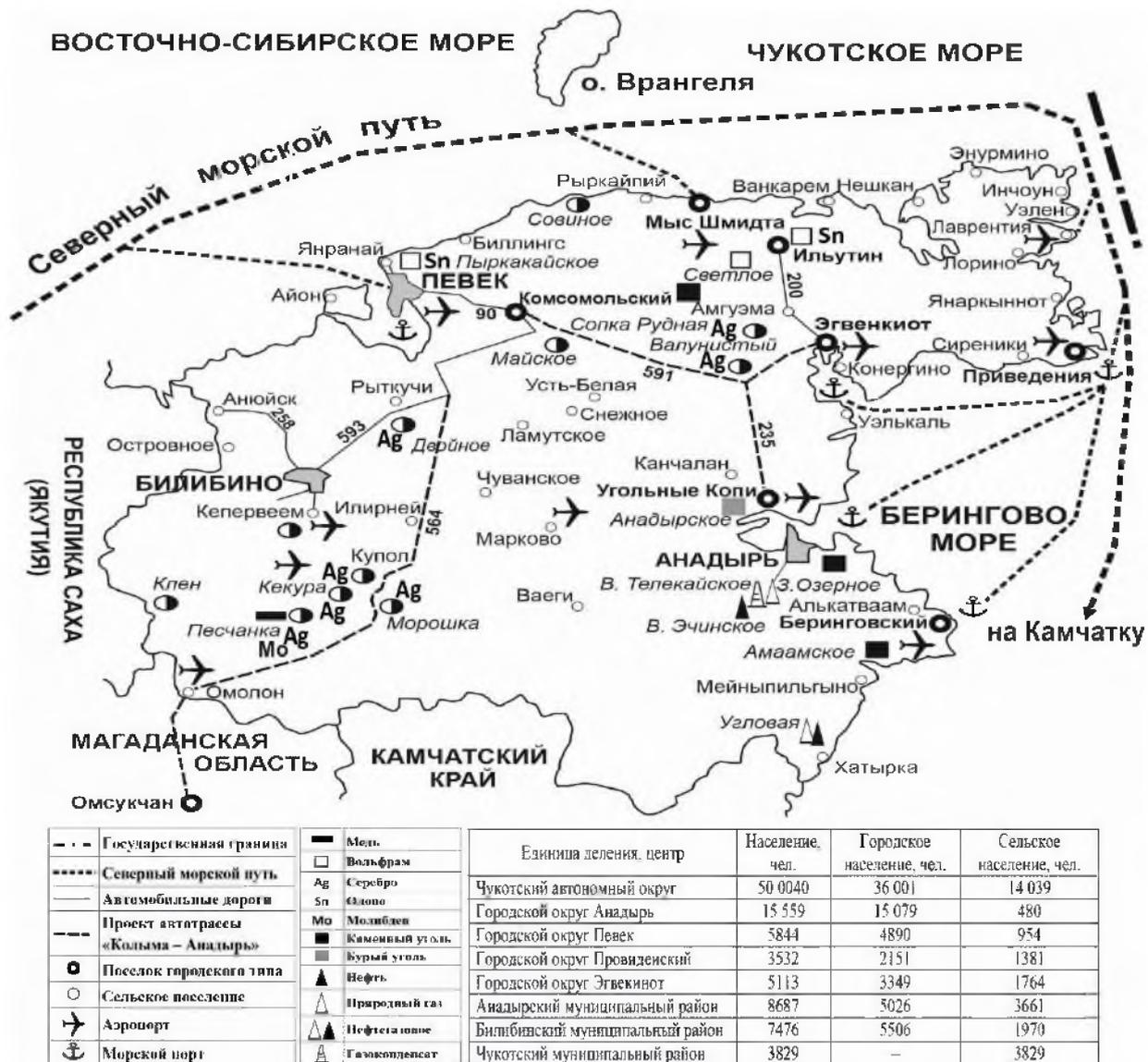
Объект исследования – территориальная организация энергосистемы Чукотки.

Чукотка самый северо-восточный субъект Российской Федерации. К региону часто используют эпитет «самый-самый» (экстремальный, удаленный), или «нет» (дорог, коммуникаций). Округ занимает часть материка, одноименный полуостров, прибрежные острова (рис. 1). По суше регион граничит с Республикой Саха (Якутия), Магаданской областью и Камчатским краем. С северо-востока проходит морская граница с США (Берингов пролив). Климат субарктический (зима 10 месяцев), здесь повсеместен горный рельеф и вечная мерзлота (Крайний Север).

В округе на площади 721,5 тыс. км² проживает чуть более 50 тыс. чел. (из них $\frac{3}{4}$ городское население). По плотности населения Чукотка занимает последнее место в России (0,07 чел./км²). В субъекте четыре города (Анадырь, Эгвекинот, Певек, Providенский), три муниципальных района и до 30 сельских поселений [Население..., 2022]. Поселения сконцентрированы у портов и на побережье. Исключение – поселки первопроходцев (Островное, Марково, Анюйск), возникшие в районах горнодобычи, или новые города (Билибино). Транспортная удаленность определяет высокую стоимость жизни. Если показатель условно принять равным единице, индекс в Москве составит 1,28, а в Анадыре и Певеке почти – 1,6 [Российский статистический..., 2021].

При полном отсутствии железных дорог Чукотка отличается очень низким уровнем развития сухопутного транспорта (сеть не создают). Протяженность автодорог с твердым покрытием всего 1 км / 1 тыс. км² (в городах), зато широко используются сезонные дороги (зимники, почти 4 тыс. км). С 2012 года ведется строительство автодороги «Колыма – Омсукчан – Омолон – Анадырь» с подъездами к городу Билибино, пгт Комсомольскому и Эгвекиноту (1800 км). В случае реализации проекта возможна круглогодичная связь с Магаданской областью. Однако не ясны перспективы строительства самой трассы.

Для Чукотки воздушный транспорт самый распространенный и безальтернативный (11 аэропортов). Высока значимость Северного морского пути (СМП), функционирует пять портов по обработке и перевалке грузов сезонного завоза (навигация 4–5 месяцев): Анадырь, Беринговский, Певек, Эгвекинот, Providения.



Составлено автором по: [Аэропорты Чукотки..., 2015; Чукотка АО_Итого..., 2018; Обзор..., 2019; Население..., 2022; Схема и программа развития электроэнергетики Чукотского округа..., 2022].

Рис. 1. Чукотский автономный округ
Fig. 1. Chukotka Autonomous Okrug

Регион богат месторождениями полезных ископаемых: олово-вольфрамовые руды (Пыркайский рудный узел), золото-серебро (Купол, Двойное и др.), нефть и газоконденсат (Телекайское, Хатырское), уголь (Анадырское, Бухта, Угольная) и др. Геологическая изученность Чукотки не превышает 25 %. Перспективы развития топливно-энергетической базы связаны с разработкой месторождений Телекайской площади. Шахты работают на 20 % от возможностей, добыча газа не более ¼ от возможности, нефть вообще не добывается. Уникален ресурсный потенциал Баимского металлогенического пояса (медь, золото, молибден). Начаты работы по подготовке ряда месторождений к эксплуатации (Песчанка, Кекура). Песчанка наиболее крупное месторождение, выход на проектную мощность планируется в 2025 году (запасы 23 млн т меди и 2 тыс. т золота). Импорт ориентирован в Китай и Японию через порт Певек [Чукотка АО_Итого..., 2018; Обзор добывающей ..., 2019].



В условиях экстремальных природно-климатических условий всегда актуальна проблема надежности электроэнергетических систем (энергосистем). В первую очередь по способности объекта выполнять функции в заданном объеме при определенных условиях [Чельцов и др., 2007]. В Советском Союзе проблема решалась комплексно за счет опережающего обеспечения топливом, наращивания мощности электростанций и электрической сети [Мелентьев, 1982]. Однако морфологическая оптимизация более простой и менее затратный путь укрепления надежности энергоснабжения [Методы и модели..., 2010; Кучеров и др., 2013; Инфраструктура пространственного развития..., 2020]. Следовательно, востребован синтез технико-экономических подходов и возможности конструктивной географии.

В работе широко использован системный подход, метод топоморфологического расчленения сети и ее последующий геосетевой анализ [Тархов, 2005]. Графическая оценка связности системы энергоснабжения базируется на математической теории графов О. Оре [1980]. Научные положения теории адаптированы к управлению энергосистемами [Ильинский, Цаценкин, 1968; Мелентьев, 1982; Совалов, Семенов, 1988].

В энергосистеме по признаку «есть – нет» выделено два ареала [Алаев, 1983]: централизованного и децентрализованного электроснабжения. Централизация подразумевает обеспечение нужд потребителей от энергосистем [ГОСТ. Р 57114-2016].

В зоне централизации выделяют два главных сетевых элемента: цикл и ветвь-дерево (рис. 2). Их свойства функционально значимы. В цикле разрыв ребра (сбой) можно компенсировать запиткой по другому ребру (циклические сети, надежность). Разрыв сети «ветвь-дерево» обесточивает потребителей (ациклические сети, уязвимость). Надежность сети оценивается морфологическим типом управления. Градация оценки варьирует от «очень высокая уязвимость энергосистемы и потребителей в зоне обслуживания» до «очень низкая уязвимость энергосистемы» [Ильинский, Цаценкин, 1968].

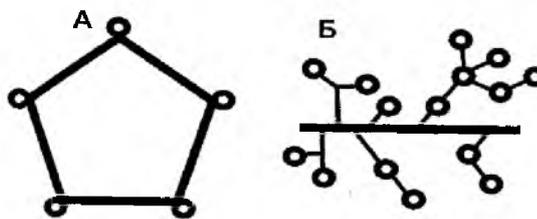


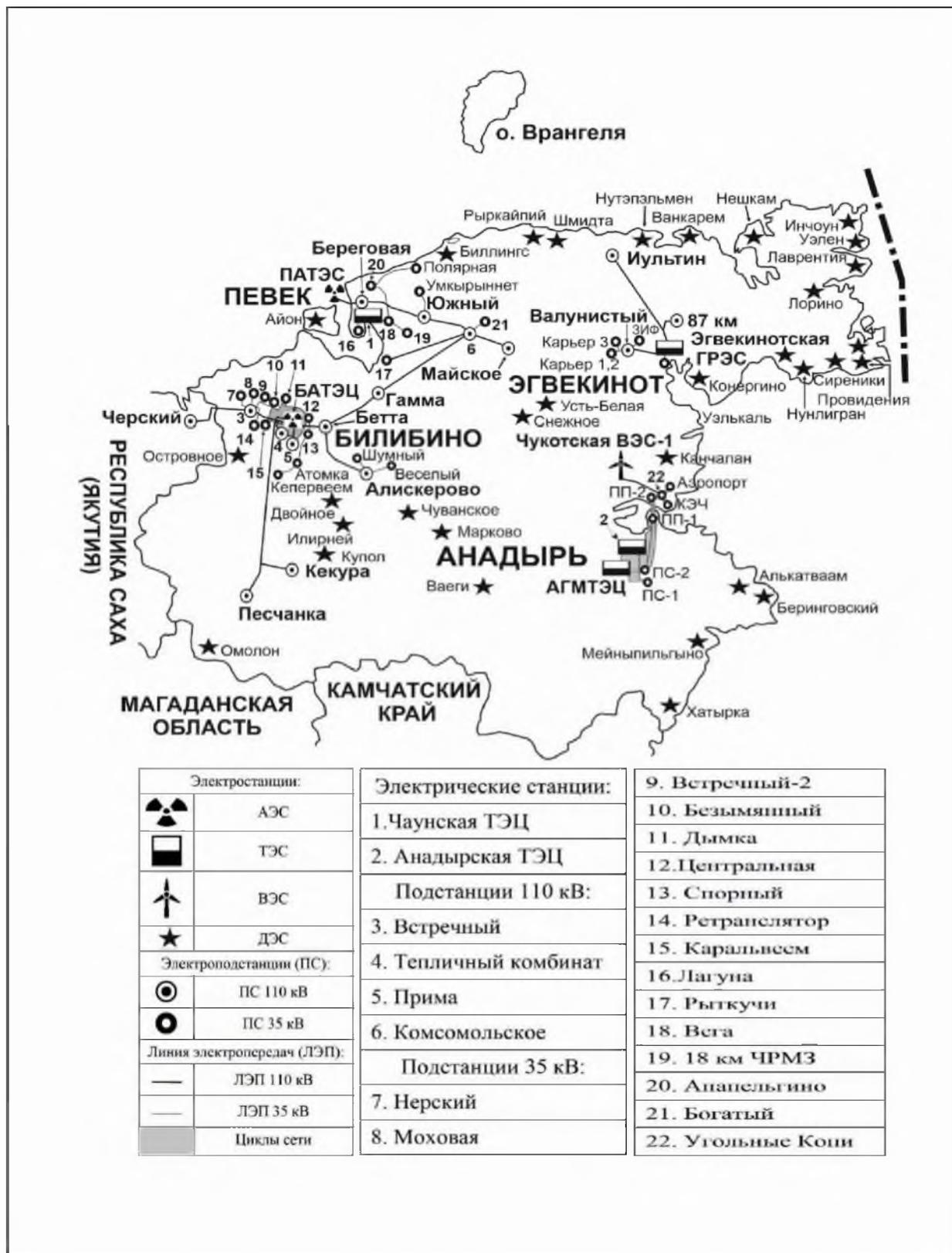
Рис. 2. Структурные элементы энергетического пространства [Атаев, 2008]
А – цикл (замкнутый контур, циклические сети); Б – ветвь-дерево (ациклические сети)
Fig. 2. Structural elements of the energy space [Атаев, 2008]
А – cycle (closed loop, cyclic networks); Б – branch-tree (acyclic networks)

Модель пространственной оптимизации энергосистемы представляет собой взаимное дополнение вертикали централизованной зоны горизонтальной интеграцией локальных систем (разномасштабная энергосистема) [Атаев, 2008; Методы и модели..., 2010]. В результате энергетическое пространство дополняется объектами малой генерации (дизельные электростанции) со своей распределительной сетью, замыкающими локальную зону электроснабжения (минимальная длина сети от генератора до потребителя). Наиболее перспективно комбинирование автономной дизельной генерации с энергоустановками на основе возобновляемых источников энергии.

Результаты и их обсуждение

В регионе именно горнодобывающая промышленность и электроэнергетика вносят наибольший вклад в валовой региональный продукт. Электроэнергетика изначально развивалась с целью обслуживания добычи полезных ископаемых (рис. 3, табл.).

Энергосистема Чукотки избыточна, объем производства 782,5 млн кВт·ч, а внутреннее потребление – 653,3 млн кВт·ч/год. Часть электроэнергии поставляется в соседний регион (Якутия, пос. Черский). Суммарная мощность электростанций 360,4 МВт.



Составлено автором по данным: [Схема и программа развития электроэнергетики Чукотского округа..., 2022; Системный оператор..., 2023; Схема ЛЭП..., 2023]

Рис. 3. Энергосистема Чукотского автономного округа
 Fig. 3. The power system of the Chukotka Autonomous Okrug



Электрический баланс, генерация и сетевое хозяйство Чукотской энергосистемы (2021 год)
Electric balance, generation and grid management of the Chukotka Power System (2021)

Электрический баланс Чукотского автономного округа						
Параметры баланса, млн кВт·ч			Структура полезного отпуска электроэнергии, в %			
Производство	Потребление	Экспорт	Добывающая промышленность	Нужды станций	Потери в сетях	Население
782,49	653,29	13,50	51,0	17,0	9,0	7,0
Электростанции Чукотки						
Электростанция (год ввода в эксплуатацию)	Установленная мощность, МВт	Объем производства электроэнергии, млн кВт·ч/год	КИУМ в %			
Плавучая атомная ТЭС (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» (2020)	70,000	284,97 «Росэнергоатом»	28,65			
Билибинская атомная ТЭЦ (1974)	36,000		67,28			
Анадырская ТЭЦ (1986)	54,600	258,11 «Чукотэнерго»	12,89			
Анадырская ГМТЭЦ (2006)	28,650		38,19			
Эгвекинотская ГРЭС (1952)	34,000		24,21			
Чаунская ТЭЦ (1944)	39,000		20,00			
ДЭС ГП ЧАО «Чукоткоммунхоз» (суммарно 38 единиц)	37,269		48,08	15,25		
ДЭС МУП «Айсберг»	11,690	16,36	16,89			
ДЭС МП ЖКХ Билибинского района	7,240	6,10	7,71			
ДЭС МП «Чаунский коммунхоз»	1,400	1,50	7,13			
ДЭС ООО «Электро-Инчоун»	0,850	0,97	13,42			
ДЭС МУП ЖКХ «Иультинское»	8,428	9,26	14,81			
ДЭС АО «Чукотская горно-геологическая компания»	28,675	154,44	57,55			
Анадырская ВЭС	2,580	2,70	14,61			
Сумма	360,390	782,49	–			
Сетевое хозяйство Чукотской энергосистемы						
Энергетический узел (район)	Подстанции (ПС)			Линии электропередач (ЛЭП)		
	110 кВ, ед.	35 кВ, ед.	Мощность ПС ≥ 35 кВ, МВа	110 кВ, ед./км	35 кВ, ед./км	
Чаун-Билибинский	17	27	407,6	13 / 1097,0	22 / 329,7	
Анадырский	–	6	65,8	–	16 / 16,6	
Эгвекинотский	3	5	13,7	2 / 265,7	5 / 265,7	
Сумма	20	38	487,1	15 / 1354,4	43 / 354,6	

Примечание: КИУМ – коэффициент использования установленной мощности электростанций; АЭС – атомная электростанция; ГРЭС – государственная районная электростанция; ДЭС – дизельная электростанция; ТЭЦ – теплоэлектроцентраль, ГМТЭЦ – газомоторная ТЭЦ; ВЭС – ветроэлектрическая станция. Таблица составлена автором по данным: [Схема и программа развития электроэнергетики Чукотского округа..., 2022; Системный оператор..., 2023].

АО «Чукотэнерго» включает четыре станции. Анадырская ТЭЦ и Эгвекинотская ГРЭС ориентированы на сжигание местного бурого угля (шахта «Угольная»). В 2003 году началась разработка Западно-Озерновского газового месторождения, построен газопровод до г. Анадыря (103 км). Была введена в эксплуатацию Анадырская газомоторная ТЭЦ



(2006 год). Чаунская ТЭЦ использовала каменный уголь из шахты «Беринговская». С 1997 года переведена на привозной уголь Зырянского разреза Якутии (морские поставки). Чаунская ТЭЦ старая станция и полностью выработала ресурс (демонтаж запланирован на 2026 год). Замену выбывающей мощности должна обеспечить новая тепловая электростанция в г. Певеке (50 МВт) [Схема и программа развития электроэнергетики Чукотского округа..., 2022].

Объекты атомной энергетики (АО «Росэнергоатом»). Билибинская атомная ТЭЦ (1974 год) планируется к консервации в 2027 году. Выбывающая мощность компенсирована вводом в эксплуатацию в 2020 году плавучей атомной тепловой электростанции «Академик Ломоносов» (ПАТЭС, пришвартована в порту Певек).

Потенциал дизельных станций суммарно составляет 95,6 МВт. Из них почти $\frac{1}{2}$ мощности принадлежат «Чукоткоммунхоз», по производству лидирует «Чукотская горно-геологическая компания» (154,4 млн кВт·ч/год). С 2002 года эксплуатируется ветродизельный комплекс Чукотская ВЭС-1 (Анадырский район, Мыс Обсервации).

Сетевое хозяйство в сложных условиях Чукотки представлено узким диапазоном напряжения. Системообразующая сеть сформирована на 35–110 кВ, распределительная – 6–0,4 кВ. Длина сети 35–110 кВ составляет 1709,0 км, а мощность подстанций – 487,1 МВа.

Территориальная организация энергосистемы Чукотки представляет слепок рисунка концентрации населения, транспорта и горнодобывающей промышленности. Зона централизованного электроснабжения включает три изолированных района (см. рис. 3).

Чаун-Билибинский район (Билибинской АТЭЦ, ПАТЭС «Академик Ломоносов» и Чаунской ТЭЦ). Здесь сосредоточен основной сетевой потенциал региона. Район включает Певекский и Билибинский узлы, соединенные сетью 110 кВ (1960 год). При разрыве сети район распадется на два автономных сегмента. После демонтажа Билибинской АТЭЦ прогнозируема актуализация энергетической проблемы г. Билибино. Для компенсации намечено построить новую тепловую станцию (Энергоцентр).

Анадырский район, централизованное электроснабжение обеспечивается параллельной работой Анадырской и газомоторной ТЭЦ. В Эгвекинотском районе электроснабжение обеспечивает единственная Эгвекинотская ГРЭС (34 МВт).

В пределах районов можно выделить циклические сети: Анадырь (8 циклов); Билибино (2 цикла), Певек и Эгвекино по одному циклу (замыкает распределительная сеть). Это ареал концентрации населения, транспорта и экономики региона. В циклах доминирует смешанный тип управления сетями: очень низкая уязвимость энергосистемы.

Остальная территория Чукотского автономного округа – это зона децентрализованного электроснабжения («море периферии»). Основа генерации – дизель-генераторы, их надежность не гарантирована и зависит от комплекса факторов. В основе проблем зависимость от дальнепривозного топлива (до 70 тыс. т/год). Сложная логистика, за короткую навигацию необходимо доставить топливо в порты, далее по зимнику. На своевременный завоз негативно влияет комплекс факторов: частота смены погоды, уровень подьема воды в реках, штормовая погода в заливах Берингова моря и т. п.

Проблемы перспективного развития энергосистемы Чукотки вытекают из ее пространственной и технологической изоляции. Следовательно, пространственное моделирование выступает основой поиска пути решения проблемы.

Региональная изоляция определяет необходимость содержания протяженной сети и крупного резерва мощности электростанций. Потенциал электроэнергетики создавался из расчета на расширение добычи полезных ископаемых и рост населения. Максимум численности населения был зафиксирован в 1989 году (163,2 тыс. чел.). После распада СССР предприятия горнодобычи обанкротились, уехало свыше 100 тыс. чел. (2/3 населения), рабочие поселки обезлюдели. В сельской местности сохранились малые аборигенные поселения (14 тыс. чел.) [Авдеев и др., 2020]. В результате мощности генерации и инфраструктуры были созданы, но оказалась не востребованы.

В последние годы возник всплеск интереса к крупнейшим месторождениям полезных ископаемых, что требует оптимизации энергоснабжения. В качестве такой предлагается пространственная модель разномасштабной энергосистемы (рис. 4).



Составлено автором по данным: [Схема и программа развития электроэнергетики Чукотского округа..., 2022; Схема и программа развития электроэнергетики Магаданской области..., 2022; Системный оператор..., 2023; Схема ЛЭП..., 2023].

Рис. 4. Модель территориальной организации энергосистемы Чукотского автономного округа
 Fig. 4. Model of the territorial organization of the energy system of the Chukotka Autonomous Okrug

Изоляция Чукотки от энергосистем соседних регионов условна. Электроснабжение п. Черский на крайнем северо-востоке Республики Саха (Якутия) осуществляется по сети 110 кВ (ПС Черский – Встречный). Поселок Черский расположен в зоне децентрализованного электроснабжения Северного энергорайона (Нижнеколымский улус). Таким образом, внешняя связь существует только с изолированным сегментом энергосистемы Якутии [Схема и программа развития электроэнергетики Республики Саха ..., 2020].



Более благоприятна ситуация для объединения с Магаданской областью вдоль маршрута строительства федеральной автодороги «Колыма – Анадырь». Логично параллельное сооружение двухцепной сети 220 кВ (ПС Омсукчан – Песчанка). С севера навстречу сооружается вторая цепь сети 110 кВ (Билибино – Кекура – Песчанка). Результат, объединение Магаданской и Чукотской энергосистемы к 2026 году. Электроэнергетика Магадана избыточна по мощности, резерв превышает 200 % [Схема и программа развития электроэнергетики Магаданской области..., 2022].

Следующий уровень изоляции – это автономная сегментация региональной энергосистемы. Усиление связности узлов Певек – Билибино планируется за счет строительства двухцепной сети 110 кВ. Связь Анадырского и Эгвекинотского районов планируется реализовать за счет сооружения сети Анадырь – Валунистый (110 кВ), что обеспечит доступ Эгвекинота к не востребуемым мощностям Анадырского района. Более реальна сеть ПС Майское – Валунистый (110 кВ). Среди перспективных маршрутов можно упомянуть ПС Майское – Совиное для обеспечения нужд добычи золота (2026 год) [Схема и программа развития электроэнергетики Чукотского округа..., 2022].

Проблемным является и изоляция локального уровня энергетического пространства Чукотки (зона децентрализации). Здесь эксплуатация дизельных электростанций в экстремальных условиях имеет следствием ускоренный износ, высокие расходы на содержание и эксплуатацию. Комбинирование с возобновляемой энергетикой экономит топлива, снижает зависимость от дорогого завоза.

Только ветроэнергетические ресурсы Чукотки достигают более 1,0 трлн. кВт·ч/год. По режиму энергетического насыщения отличаются стабильностью в течение года. Среднегодовая удельная мощность превышает 500 Вт/кв. м [Панин и др., 2016]. Перспективно развитие геотермальной энергетики, на востоке выявлено более 10 групп источников (Лоринские, Чаплинские и др.) [Arnason et al., 2005]. В ряде сельских поселений региона уже функционируют автономные гибридные энергоустановки дизель-генератор – ветроэлектростанция – гелиоустановка (Канчалан, Снежное, Марково) [Альтернативную энергетику..., 2022]. Комбинированная генерация способствует снижению тарифа, достигающего на Чукотке 6–12 руб. / кВт·ч (2022 год). Дизельная генерация формирует тариф еще выше, затраты только на завоз топлива составляют 70 % в калькуляции себестоимости производства [Тарифы..., 2022].

В регионе уже сложилась ситуация, когда промышленные потребители предпочитают создавать собственную автономную генерацию. В условиях территориальной удаленности и энергетической изоляции такая стратегия вполне оправдана в арктических районах [De Witt et al., 2021]. Проектирование гибридной системы с использованием возобновляемой энергетики оптимально для устойчивого энергоснабжения отдаленных территорий [Ali, Jang, 2020]. В том числе и по схеме создания автономных энергосистем [Akram et al., 2020]. Правительство Чукотки и РАО «ЭС Востока» признают перспективность масштабного развития ветроэнергетики в будущем. Между тем доставка топлива все дороже, а ее финансирование поступает несвоевременно, наблюдается деградация речного и прибрежного морского судоходства. Актуальны проекты оснащения чукотских сел ветродизельными комплексами [Бердин и др., 2017].

Заключение

Энергосистема Чукотки изначально развивалась с целью обслуживания добычи полезных ископаемых. Отраслевой потенциал избыточен. Централизованная энергосистема состоит из трех изолированных частей. Остальная территория – это зона децентрализованного электроснабжения.

Ключевые проблемы энергосистемы вытекают из ее «многослойной» изоляции. Пространственная модель оптимизации представляет разномасштабную энергосистему.



Логично увязать перспективы развития со строительством федеральной дороги «Колыма – Анадырь» и сооружением ЛЭП 220 кВ Омсукчан (ПАО «Магаданэнерго») – Песчанка. Связность изолированных частей региональной энергосистемы может быть обеспечена наращиванием сети 35–110 кВ (связь Чаун-Билибинского, Анадырского и Эгвекинотского районов). В результате, возможна параллельная работа структурных элементов региональной энергосистемы.

В зоне децентрализованного электроснабжения доминирует автономная дизельная генерация с высокой зависимостью от дальнепривозного топлива. Комбинирование с возобновляемой энергетикой способствует экономии дизельного топлива, снижает зависимость от дорогого завоза, способствует снижению отпускного тарифа.

Список источников

- Алаев Э.Б. 1983. Социально-экономическая география: Понятийно-терминологический словарь. Москва, Мысль, 290 с.
- Альтернативную энергетику развивают на Чукотке (2022 г.). Электронный ресурс. URL: <http://www.chaogov.ru/press-tsentr/novosti-cao...energetiku> (дата обращения 16.05.2023).
- Аэропорты Чукотки: basov-chukotka (2015 г.). Электронный ресурс. URL: <http://www.Basov-chukotka.livejotka.com>. Аэропорты Чукотки... (дата обращения 27.05.2023).
- ГОСТ Р 57114-2016. Национальный стандарт Российской Федерации «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы, термины и определения» (Введен в действие 01.06.2017 г.). Электронный ресурс. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/1200139922...> (дата обращения 25.05.2023).
- Население Чукотского автономного округа по муниципальным образованиям и сельским населенным пунктам на 1 января 2022 г. Электронный ресурс. URL: <http://www.hadstat.gcs.ru...naselenie/chukotskogo-ao> (дата обращения 06.06.2023).
- Обзор добывающей промышленности Чукотки (2019 г.). Глобус, геология и бизнес. Электронный ресурс. URL: <http://www.vinedra.ru/glavnaya-tema/chukotka-novye-gorizonty...> (дата обращения 31.06.2023).
- Российский статистический ежегодник. 2021. М., Росстат: 552–553.
- Системный оператор ЕЭС России (СО ЕЭС России). Единая энергетическая система России. Электронный ресурс. URL: <http://www.so-ups.ru/functioning/ees/ups2021/>. (дата обращения 15.05.2023).
- Схема и программа развития электроэнергетики Чукотского автономного округа на 2022–2026 годы. Электронный ресурс. URL: <http://www.чукотка.рф/upload/lbioc/693/6936015a2016772078исув71...> (дата обращения 03.07.2023).
- Схема ЛЭП и электроснабжения России (актуальность данных: 30.06.2023 г.). Интерактивная карта электроэнергетической системы на данных проекта OpenStreetMap. Электронный ресурс. URL: <http://www.freosm.ru> (дата обращения 05.07.2023).
- Схема и программа развития электроэнергетики Магаданской области на 2022–2026 годы (2022 г.). Электронный ресурс. URL: <http://www.minstrov.49gov.ru/common/upload...editor/file/sipr...> (дата обращения 08.07.2023).
- Схема и программа развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2020–2024 гг. Электронный ресурс. URL: <http://www.docs.cntd.ru/dokument/574729169...> (дата обращения 11.07.2023).
- Тарифы на электроэнергию в Чукотском автономном округе. Действуют с 1 января 2022 г. Электронный ресурс. URL: <http://www.energovorros.ru>. Справочник. Свет. Тарифы на электроэнергию.../ (дата обращения 15.07.2023).
- Чельцов М.Б., Воропай Н.И., Илькевич Н.И., Ковалев Г.Ф., Савельев В.А., Славин Г.Б., Федотова Г.А. 2007. Надежность систем энергетики (сборник рекомендуемых терминов). Москва, Энергия, 192 с.
- Чукотка АО Итого. Информационная справка «О состоянии минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых», 2018 г. Электронный ресурс. URL: <http://www.vims-geo.ru>. Экономика... -i-razvitile-chast-i (дата обращения 30.06.2023).



Список литературы

- Авдеев Ю.А., Сидоркина З.И., Ушакова В.Л. 2020. Тенденции демографического развития в районах российской восточной Арктики. *Народонаселение*, 23(3): 130–144. <https://doi.org/10.19181/population.2020.23.3.12>
- Атаев З.А. 2008. Географические основы локальной энергетики Центрального экономического района России. Рязань, РГУ им. С.А. Есенина, 283 с.
- Байков В.А., Ткаченко Д.А., Пузаков В.С., Сущенко В.В. 2015. Особенности энергоснабжения удаленных территорий на востоке России на примере Чукотского автономного округа. *Новости теплоснабжения*, 09(181).
- Бердин В.Х., Кокорин А.О., Юлкин Г.М., Юлкин М.А. 2017. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики. Москва, Всемирный фонд дикой природы, 80 с.
- Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Шевчук В.А., Федоров О.В. 2021. Перспективы развития энергетического комплекса Северо-Востока России. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 23(3): 58–69. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69>.
- Иванов А.В., Складчиков А.А., Хренников А.Ю. 2021. Развитие электроэнергетики арктических регионов Российской Федерации с учетом использования возобновляемых источников энергии. *Российская Арктика*, 2(13): 62–80. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-20212-62-80>.
- Ильинский Н.Ф., Цаценкин В.К. 1968. Приложение теории графов к задачам электромеханики. Москва, Энергия, 200 с.
- Инфраструктура пространственного развития РФ: транспорт, энергетика, инновационная система, жизнеобеспечение. 2020. Под ред. О.В. Тарасова. Новосибирск, Институт экономики и организации производства Сибирского отделения Российской академии наук, 456 с.
- Кучеров Ю.Н., Дьяков А.Ф., Китушин В.Г., Крупенев Д.С., Куменко А.И., Кутовой П.П., Лебедева Л.М., Левина Л.А., Магид С.И., Манов Н.А., Назарычев А.Н., Непомнящий В.А., Овсейчук В.А., Огороков В.Р., Огороков В.Р., Папков Б.В., Пяткова Н.И., Рыжов Ю.А., Рыжов Ю.А., Славин Г.Б., Степанов Н.В., Таджибаев А.И., Федотова Г.А., Цыганков С.С., Чельцов М.Б., Шлайфштейн В.А., Эдельман В.И. 2013. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике. Москва, Энергия, 304 с.
- Мелентьев Л.А. 1982. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. Москва, Высшая школа, 319 с.
- Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем. 2010. Под ред. Н.А. Манова. Сыктывкар, Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук, 292 с.
- Моргунова М.О., Цуневский А.Я. 2012. Энергия Арктики. Москва, ИЦ Энергия, 84 с.
- Оре О. 1980. Теория графов. 2-е изд. Москва, Наука, 356 с.
- Панин С.В., Прохоров В.Н., Смирнова О.О. 2016. Малая возобновляемая энергетика – решение больших проблем. На примере Чукотского автономного округа. *Современные инновации*, 12(14): 47–53.
- Сансеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. 2018. Проблемы энергетики Восточной зоны Российской Арктики и возможные пути решения. *Синергия Арктики*, 4: 80–88.
- Сансеев Б., Иванова И., Ижбулдин А. 2021. Влияние освоения ресурсов Восточной Арктики на энерго и топливоснабжение потребителей. *Энергетическая политика*, 7(181): 86–95. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_7161_86
- Совалов С.А., Семенов В.А. 1988. Противоаварийное управление в энергосистемах. Москва, Энергоатомиздат, 416 с.
- Тархов С.А. 2005. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск–Москва, Универсум, 384 с.
- Ali S., Jang C.-M. 2020. Optimum Design of Hybrid Renewable Energy System for Sustainable Energy Supply to a Remote Island. *Sustainability*, 12(3): 1280. <https://doi.org/10.3390/su12031280>
- Akram F., Asghar F., Majeed M.A., Amjad W., Manzoor M.O., Munir A. 2020. Techno-Economic Optimization Analysis of Stand-Alone Renewable Energy System for Remote Areas. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38: 100673. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100673>



- Arason K., Franzson H., Richter B., Thordarson S., Hjartarson A. 2005. Geothermal Exploration in Chukotka, Far East Russia. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24–29 April 2005. Antalya, Turkey: 1–12.
- De Witt M., Stefánsson H., Valfells Á., Larsen J.N. 2021. Energy Resources and Electricity Generation in Arctic areas. *Renewable Energy*, 169: 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.025>.

References

- Avdeev Yu.A., Sidorkina Z.I., Ushakova V.L. 2020. Demographic Development Trends in the Russian Eastern Arctic. *Population*, 23(3): 130–144 (in Russian). <https://doi.org/10.19181/population.2020.23.3.12>
- Ataev Z.A. 2008. Geograficheskiye osnovy lokalnoy energetiki Tsentralnogo ekonomicheskogo rayona Rossii [Geographical bases of local energy of the Central Economic Region of Russia]. Ryazan, Publ. RGU im. S.A. Esenina, 283 p.
- Baykov V.A., Tkachenko D.A., Puzakov V.S., Sushchenko V.V. 2015. Osobennosti energosnabzheniya udalennykh territoriy na vostoке Rossii na primere Chukotskogo avtonomnogo okruga [Features of Energy Supply to Remote Areas in Eastern Russia on the Example of the Chukotka Autonomous Okrug]. *Novosti teplosnabzheniya*, 09 (181).
- Berdin V.H., Kokorin A.O., Yulkin G.M., Yulkin M.A. 2017. Vozobnovlyayemye istochniki energii v izolirovannykh naselednykh punktakh Rossiyskoy Arktiki [Renewable Energy Sources in Isolated Settlements of the Russian Arctic]. Moscow, Publ. Vsemirnyy fond dikoy prirody, 80 p.
- Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Shevchuk V.A., Fedorov O.V. 2021. Prospects for the Development of the Energy Complex of the North-East of Russia. *Power engineering: research, equipment, technology*, 23(3): 58–69 (in Russian). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69>
- Ivanov A.V., Skladchikov A.A., Khrennikov A.Yu. 2021. Development of Electric Power Industry in the Arctic Regions of the Russian Federation, Considering the Use of Renewable Energy Sources. *Russian Arctic*, 2(13): 62–80 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-20212-62-80>
- Ilyinsky N.F., Tsatsenkin V.K. 1968. Prilozheniye teorii grafov k zadacham elektromekhaniki [Application of Graph Theory to Problems of Electromechanics]. Moscow, Publ. Energiya, 200 p.
- Infrastructure of spatial development of the Russian Federation: transport, energy, innovation system, life support. 2020. Ed. by O.V. Tarasov. Novosibirsk, Publ. Institute of Economics and Production Organization of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 456 p. (in Russian).
- Kucherov Yu.N., Diakov A.F., Kitushin V.G., Krupenev D.S., Kumenko A.I., Kutovoy P.P., Lebedeva L.M., Levina L.A., Magid S.I., Manov N.A., Nazarychev A.N., Nepomnyashchiy V.A., Ovseychuk V.A., Okorokov V.R., Okorokov V.R., Papkov B.V., Pyatkova N.I., Ryzhov Yu.A., Ryzhov Yu.A., Slavin G.B., Stepanov N.V., Tadzhibayev A.I., Fedotova G.A., Tsygankov S.S., Cheltsov M.B., Shlayfshteyn V.A., Edelman V.I. 2013. Kontseptsiya obespecheniya nadezhnosti v elektroenergetike [The Concept of Ensuring Reliability in the Electric Power Industry]. Moscow, Publ. Energiya, 304 p.
- Melentyev L.A. 1982. Optimizatsiya razvitiya i upravleniya bolshikh sistem energetiki [Optimization of Development and Management of Large Energy Systems]. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 319 p.
- Metody i modeli issledovaniya nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem [Methods and Models for Studying the Reliability of Electric Power Systems]. 2010. Ed. by N.A. Manov. Syktyvkar, Publ. Komi nauchnyy tsentr Uralskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 292 p.
- Morgunova M.O., Tsunevsky A.Ya. 2012. Energiya Arktiki [Energy of the Arctic]. Moscow, Publ. ITs Energiya, 84 p.
- Ore O. 1980. Teoriya grafov [Graph Theory]. Moscow, Publ. Nauka, 356 p.
- Panin S.V., Prokhorov V.N., Smirnova O.O. 2016. Malaya vozobnovlyayemaya energetika – resheniye bolshikh problem. Na primere Chukotskogo avtonomnogo okruga. [Small Renewable Energy is the Solution to Big Problems. On the Example of the Chukotka Autonomous Okrug]. *Sovremennyye innovatsii*, 12(14): 47–53.
- Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F. 2018. Energy Problems in the Eastern Zone of Russian Arctic and Possible Solutions. *Synergy of the Arctic*, 4: 80–88 (in Russian).



- Saneev B., Ivanova I., Izhbuldin A. 2021. The Impact of the Development of the Resources of the Eastern Arctic on Energy and Fuel Supply to Consumers. *Energy Policy*, 7(181): 86–95 (in Russian). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_7161_86.
- Sovalov S.A., Semenov V.A. 1988. *Protivoavariynoye upravleniye v energosistemakh* [Emergency Management in Power Systems]. Moscow, Publ. Energoatomizdat, 416 p.
- Tarkhov S.A. 2005. *Evolyutsionnaya morfologiya transportnykh setey* [Evolutionary Morphology of Transport Networks]. Smolensk–Moscow, Publ. Universum, 384 p.
- Ali S., Jang C.-M. 2020. Optimum Design of Hybrid Renewable Energy System for Sustainable Energy Supply to a Remote Island. *Sustainability*, 12(3): 1280. <https://doi.org/10.3390/su12031280>.
- Akram F., Asghar F., Majeed M.A., Amjad W., Manzoor M.O., Munir A. 2020. Techno-Economic Optimization Analysis of Stand-Alone Renewable Energy System for Remote Areas. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38: 100673. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100673>.
- Arnason K., Franzson H., Richter B., Thordarson S., Hjartarson A. 2005. Geothermal Exploration in Chukotka, Far East Russia. *Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24–29 April 2005*. Antalya, Turkey: 1–12.
- De Witt M., Stefánsson H., Valfells Á., Larsen J.N. 2021. Energy Resources and Electricity Generation in Arctic areas. *Renewable Energy*, 169: 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.025>.

Поступила в редакцию 22.08.2023;

поступила после рецензирования 24.10.2023;

принята к публикации 12.11.2023

Received August 22, 2023;

Revised October 24, 2023;

Accepted November 12, 2023

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Атаев Заирбег Авукавович, доктор географических наук, руководитель научно-исследовательского центра «Возобновляемые источники энергии и энергетика», Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, г. Рязань, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zairbeg A. Ataev, Doctor of Geographical Sciences, Head of the Research Center "Renewable Energy Sources and Energy", Ryazan State University named after S.A. Yesenin, Ryazan, Russia