

## МАЛАЯ АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В КОНТЕКСТЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**А.А. Саркисов, С.В. Антипов, Д.О. Смоленцев, В.П. Билашенко,  
М.Н. Кобринский, В.А. Сотников, П.А. Шведов**

*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской  
Академии наук*

*115191, Россия, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52*

**Р**

Возрастающая экономическая роль Арктики, интенсификация морских транспортных коммуникаций, а также исключительная чувствительность природной среды Арктического региона к антропогенным воздействиям являются фундаментальными факторами для всестороннего исследования экологических аспектов применения инновационных технологий в развитии инфраструктуры Арктики.

Несмотря на усиливающийся интерес к атомным станциям малой мощности как к объекту распределенной генерации их возможное применение в технологически изолированных энергосистемах не теряет актуальности. Развитие Арктики и Дальневосточного региона Российской Федерации представляет широкие возможности и востребованность для применения атомных энергоисточников. Также программы развития Арктической зоны Российской Федерации предполагают значительное увеличение роли и количества объектов атомной энергетики как потенциальных радиационно опасных.

Масштабное применение ядерных установок в Арктическом регионе требует опережающего развития научно-обоснованной и современной системы прогнозов и оценки угроз и рисков на случай возможных радиационных аварий на ядерных и радиационно опасных объектах, а также разработки предложений для принятия необходимых мер по минимизации негативных последствий таких аварий. Особенно это актуально для компактного размещения промышленных, инфраструктурных и жилых объектов в Арктике в непосредственной близости от объектов с ядерными установками.

Показано, что востребованность атомных станций малой мощности и их конкурентоспособность будут неуклонно расти в условиях децентрализации электроэнергетики, распространения распределенной генерации и развития технологически изолированных энергосистем. Представлены подходы к построению системы малой атомной энергетики, основанной на философии индустриализации производства и централизованного обращения. Представлены особенности проведения оценки воздействия на окружающую среду атомных станций малой мощности для формирования методологии исследования проблем радиологической опасности.

**Ключевые слова:** Арктика, технологически изолированные энергосистемы, распределенная генерация, атомные станции малой мощности, прогноз развития, ради-

© А.А. Саркисов, С.В. Антипов, Д.О. Смоленцев, В.П. Билашенко, М.Н. Кобринский, В.А. Сотников, П.А. Шведов, 2020

ационная безопасность, морские акватории, математическое моделирование.

### **АТОМНЫЕ ЭНЕРГОИСТОЧНИКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

Исторически атомные станции малой мощности (АСММ) рассматривались для применения в технологически изолированных энергосистемах. В Российской Федерации в силу территориальной распространенности децентрализованных энергосистем (Арктический и Дальневосточный регион) и присущих им климатических условий, требующих применение не зависящих от воздействия окружающей среды источников энергии, АСММ с высокой степенью автономности могут стать безальтернативной опорной генерацией в таких удаленных регионах. В начале XXI в. страны с развитой атомной промышленностью (США, Канада, Аргентина) стали рассматривать малые модульные реакторы (ММР, англ. Small Modular Reactors) как перспективные объекты распределённой генерации, которые являются неотъемлемыми элементами умной энергетики [1, 2]. В зарубежной практике для атомных энергоисточников малой мощности используется термин ММР, по сути ММР являются основной частью АСММ. В контексте данной статьи термины АСММ и ММР идентичны.

С 2018 г. отмечается активизация в части разработки, лицензирования и строительства АСММ. В г. Певек введена в промышленную эксплуатацию Первая в мире плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов». В России, США, Китае определены предварительные площадки размещения АСММ (на базе реакторных установок (РУ) РИТМ-200, NuScale, АСР-100 соответственно), проводятся процедуры по лицензированию; ввод в эксплуатацию пилотных станций планируется в 2027 – 2030 гг. Министерство энергетики США инициировало программу разработки и создания прототипов усовершенствованных реакторов (Advanced Reactor Demonstration Program), в рамках которой будет выделено 160 млн. долл. США. Одновременно Министерство обороны США реализует проект «Pele» с бюджетом около 40 млн. долл. США по конкурсному проектированию трех ядерных микрореакторов мощностью 1–5 МВт, из которых один проект в 2022 г. будет отобран для практической реализации [3, 4].

Децентрализация и развитие распределенной генерации является трендом, оказывающим наибольшее влияние на электроэнергетику [5 – 7]. Объектами распределенной генерации являются источники энергии, присоединенные к распределительной сети и (или) располагающиеся непосредственно у потребителя электроэнергии [8, 9]. Таким образом, для соответствия АСММ требованиям децентрализации электроэнергетических систем необходимо, чтобы

- установленная мощность АСММ соотносилась с объемами потребления в рамках электроэнергетического микрогрида, – это может достигаться за счет модульной компоновки АСММ (дискретного набора мощности);
- требования к обеспечению безопасности АСММ позволяли размещать их в непосредственной близости от потребителя, в распределительной сети.

С другой стороны, при формировании основных положений новой архитектуры электроэнергетических систем должны учитываться возможности и конкурентные преимущества АСММ:

- мобильность и модульность конструкции;
- независимость от организации логистики и инфраструктуры хранения топлива;
- минимальный объем строительно-монтажных работ на площадке размещения;
- независимость выработки электроэнергии от внешних климатических факторов;

- минимальное воздействие на окружающую среду и упрощение процедур вывоза из эксплуатации.

Термины «объект малой генерации» и «объект распределенной генерации» применительно к атомным станциям не должны ограничивать установленную мощность до 25 МВт, иначе ряд проектов АСММ (например, на базе РУ РИТМ-200) может быть исключен из архитектуры Интернета энергии. В настоящее время в соответствии со статусом субъекта оптового рынка, определенным Федеральным законом от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике», данное ограничение имеет широкое, но пока неофициальное распространение [9].

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АСММ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ**

Несмотря на возрастающий интерес к АСММ как к объекту распределенной генерации применение АСММ в технологически изолированных энергосистемах не теряет актуальности. Развитие Арктики и Дальневосточного региона Российской Федерации представляет широкие возможности и востребованность для применения атомных энергоисточников. В литературе с начала 2000-х гг. встречается информация более чем о 20-ти потенциальных площадках размещения АСММ в этих регионах.

В соответствии с основными государственными документами, регулиющими развитие электроэнергетики и Арктического региона [6, 10, 11], гражданское применение атомных энергетических технологий в Арктическом регионе России связано с развитием

- круглогодичной безопасной навигации по Северному морскому пути (создание атомных ледоколов (АЛ) нового поколения, коммерческого флота ледового класса);
- транспортной и социальной инфраструктуры, освоением месторождений минерально-сырьевых ресурсов (модернизация систем энергоснабжения и применение энергоустановок с повышенными эксплуатационными характеристиками для обеспечения надежного энергоснабжения).

В качестве объектов энергоснабжения в Арктическом регионе России рассматриваются транспортабельные модульные АСММ, атомные теплоэлектростанции, подводные АСММ для энергоснабжения шельфовых комплексов нефте- и газодобычи, необслуживаемые атомные энергоисточники с технологией прямого преобразования энергии.

Безусловно, в целях оптимизации стоимости сооружения и доступности площадки для обслуживающего и исследовательского персонала размещать первые в своем классе АСММ целесообразно в зоне централизованного электроснабжения. Экспансия в Арктический регион, где экономическая конкурентоспособность АСММ ожидаемо выше [12, 14, 15], целесообразна после отработки технологий сооружения и эксплуатации на «большой земле», налаживания серийного производства модулей АСММ.

Перспективы использования атомных энергетических технологий в Арктическом регионе, актуализированные по материалам [11 – 13], а также отраслевых средств массовой информации, представлены в табл. 1.

Создание системы малой атомной энергетики возможно как на базе текущих проектных разработок, так и посредством создания новых, унифицированных по мощностному ряду АСММ, отвечающих приведенным в первой части статьи тенденциям трансформации электроэнергетических систем. Оба пути требуют проведение аудита текущих исследований, разработок и формирование концепции развития малой атомной энергетики в Российской Федерации.

Таблица 1

**Реакторные установки, эксплуатируемые (планируемые к эксплуатации) в Арктике**

| Тип РУ                  | РУ в эксплуатации                 |                                       |                                      | Мощность<br>тепл.,<br>МВт | Объект   |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--|
|                         | 2020 г.<br>(по состоянию на июнь) | 2030 г.<br>(консервативный сценарий*) | 2030 г.<br>(оптимистичный сценарий*) |                           |  |
| ОК-900А                 | 4                                 | 2                                     | 2                                    | 171                       | АЛ «Ямал» и «50 лет Победы»  |
| КЛТ-40М                 | 2                                 | 0                                     | 0                                    | 171                       | АЛ «Вайгач» и «Таймыр»   |
| КЛТ-40                  | 1                                 | 0                                     | 0                                    | 135                       | Лихтеровоз «Севморпуть»  |
| РИТМ-200                | 0                                 | 6                                     | 10 + 2                               | 175                       | Строительство головного и 4-х серийных универсальных АЛ проекта 22220 + АСММ                               |
| РИТМ-200Б               | 0                                 | 0                                     | 1                                    | 209                       | АЛ оффшорного типа   |
| РИТМ-400                | 0                                 | 2                                     | 4 + 2                                | 315                       | Строительство головного и одного серийного АЛ проекта «Лидер» + атомные контейнеровозы арктического класса |
| КЛТ-40С                 | 2                                 | 2                                     | 4                                    | 150                       | ПАТЭС  |
| АБВ-6М                  | 0                                 | 0                                     | 1 – 2                                | 38                        | АСММ   |
| Шельф                   |                                   |                                       |                                      | 28                        |  |
| РУ мегаваттного класса  | 0                                 | 0                                     | 1 – 2                                | 3 – 6                     |  |
| Итого РУ в эксплуатации | 9                                 | 12                                    | 27 – 29                              | –                         |  |

Основными этапами разработки указанной концепции должны являться следующие.

1. Определение потенциальных мест размещения транспортабельных и стационарных АСММ (распределенная генерация, централизованная энергетика, изолированные энергосистемы).

2. Анализ возможных эксплуатационных и проектных данных по системам электро- и теплоснабжения потенциальных мест размещения АСММ. Определение базовых параметров – требований назначения (по логистике, автономности, выдаче мощности, стоимости электроэнергии) для АСММ, ориентированных на применение внутри страны.

3. Оценка экспортного потенциала АСММ. Определение базовых параметров – требований назначения для АСММ, ориентированных на экспорт.

4. Выработка критериев модульной компоновки и транспортабельности АСММ в соответствии с базовыми параметрами – требованиями назначения этапов 2 – 3.

5. Выработка критериев централизованного серийного изготовления транспортабельных АСММ. Оценка индустриального потенциала.

6. Выработка критериев централизованного обращения для модулей транспортабельных АСММ (включая этапы жизненного цикла по перегрузке топлива, обращение с РАО и ОЯТ, вывод из эксплуатации).

7. Проведение многокритериального анализа (затраты, характеристики, зрелость технологии) существующих отечественных проектов АСММ для сравнительной оценки вариантов развития систем малой атомной энергетики на их основе в сегментах

- до 5 МВт включительно (в том числе энергоисточники прямого преобразования);
- от 5 до 50 МВт включительно;
- от 50 до 300 МВт.

8. Определение унифицированных обликов АСММ по мощностному исполнению, транспортабельности и автономности эксплуатации в соответствии с критериями этапов 2 – 6.

9. Предварительное обоснование ядерной и радиационной безопасности унифицированных АСММ.

10. Анализ существующей экспериментальной базы (реакторная стендовая база, производственно-технологическая база для отработки и изготовления топлива), необходимость её модернизации и развития.

11. Разработка «Дорожной карты» создания экспериментального и головного образца унифицированной АСММ, включая кооперацию предприятий по реализации проекта.

12. Оценка стоимости создания унифицированной АСММ, формирование экономической модели жизненного цикла.

13. Подготовка предложений по номенклатуре нормативной правовой базы, подлежащей разработке для создания системы малой атомной энергетики.

### **БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АСММ В АРКТИКЕ**

В соответствии с Основами государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 г. [10] одними из основных задач в сфере охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности являются

- продолжение ликвидации накопленного вреда окружающей среде;
- реализация комплекса мер по исключению попадания в Арктическую зону Российской Федерации токсичных веществ, возбудителей инфекционных заболеваний и радиоактивных веществ.

В рамках исследований по прогнозированию воздействия на окружающую среду в случае аварий на атомных плавучих объектах АСММ рассматриваются как одни из перспективных объектов для региона. Проводится комплексное моделирование распространения радионуклидов в различных средах (воздух, вода), разрабатываются рекомендации для принятия мер по минимизации негативных последствий аварий для населения и окружающей среды.

Масштабное применение ядерных установок в Арктическом регионе требует научно обоснованной и современной системы прогнозов и оценки угроз и рисков на случай возможных радиационных аварий на ядерных и радиационно опасных объектах, а также разработки предложений для принятия необходимых мер по минимизации негативных последствий таких аварий. Особенно это актуально для компактно размещаемых промышленных, инфраструктурных и жилых объектов в Арктике, когда планируется создание АСММ в непосредственной близости от потребителя. Национальными органами, регулирующими деятельность в области атомной энергетики, стран-лидеров в атомной энергетике уже рассматриваются возможности сокращения санитарно-защитных зон и зон наблюдения для АСММ.

Для дальнейших исследований радиозологических проблем Арктической зоны

Российской Федерации с целью повышения радиационной и экологической безопасности человека и окружающей среды в условиях интенсивного использования морских и береговых ядерных энергетических установок выделены представительные на момент подготовки статьи пункты размещения АСММ. Критерием отбора перспективных площадок являлись анализ электрических нагрузок существующих и перспективных потребителей Арктического региона России, сообщения в открытых источниках информации о пилотных площадках строительства АСММ [1, 13, 14, 16].

Таблица 2

**Перспективные морские и береговые пункты размещения АСММ в Арктике**

| Пункт размещения  | Перспективные электрические нагрузки   |
|---|--|
| Арх. Новая Земля (Баренцево море), Безымянная губа              | Освоение свинцово-цинкового месторождения «Павловское»   |
| Гипотетическая нефтяная платформа в Баренцевом или Карском море | Разведочное и эксплуатационное бурение скважин, нефтедобыча  |
| Порт Диксон   | Реконструкция и расширение порта Диксон, транспортной и социальной инфраструктуры, разработка месторождения коксующихся углей                |
| Порт Тикси  | Реконструкция и расширение порта Тикси, транспортной и социальной инфраструктуры   |
| г. Певек, Чукотский АО  | Развитие Чаун-Билибинского энергоузла для освоения месторождений минерально-сырьевых ресурсов. Замещение ПАТЭС на время капитального ремонта |

При обосновании и разработке методологии исследования проблем радиоэкологической опасности, в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, учитываются следующие особенности проведения оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) для АСММ [17, 18]:

- готовность и время реагирования на чрезвычайные ситуации с учётом удаленности и транспортной доступности площадки размещения АСММ;
- длительность топливной кампании АСММ; увеличение жизненного цикла топлива до пяти – семи лет значительно уменьшает объемы хранения отработавшего топлива на площадке, а также частоту доставки и количество нового топлива, но при этом увеличивает активность наработанных продуктов деления;
- перегрузка топлива некоторых АСММ предполагается путем замены всего корпуса реактора, содержащего отработавшее топливо – эта особенность уменьшает вероятность аварий при перегрузке топлива;
- количество ядерного топлива в АСММ меньше, чем в РУ большой мощности; при моделировании аварий с выходом радионуклидов их количество может быть масштабировано по соотношению тепловой мощности РУ (табл. 1) с учетом сопоставимости длительности топливной кампании;
- обогащение ядерного топлива; при использовании ядерного топлива с аналогичным обогащением на станциях большой мощности ожидается, что изотопный состав топлива в первом приближении будет одинаков;
- конструкционная форма топливной матрицы, которая предотвращает значительные выбросы продуктов деления.

## **Выводы**

Востребованность АСММ и их конкурентоспособность будут неуклонно расти в условиях децентрализации электроэнергетики, распространения распределенной ге-

нерации и развития технологически изолированных энергосистем.

Создание АСММ связано с качественно новой философией применения атомной энергии, и прежде всего с индустриализацией их производства, а также с разработкой технологии централизованного обращения с ОЯТ и РАО.

Построение системы малой атомной энергетики возможно как на базе существующих, прошедших аудит, технологий, так и на совершенно новых разработках АСММ, основанных на принципах серийного производства, модульной компоновки, максимальной автономности, централизованного обращения и безопасного размещения вблизи потребителя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №201900615).

### **Литература**

1. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: Т. 2. / Под ред. акад. РАН А.А. Саркисова. – М.: Академ-Принт, 2015. – 387 с. – ISBN 978-5-906324-04-7.
2. Саркисов А.А. Вступительная статья председателя Программного комитета конференции «Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики». – М.: Наука, 2011. – Т. 1. – С. 7-12.
3. Advanced Reactor Demonstration Program // Электронный ресурс: <https://www.energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies/advanced-reactor-demonstration-program> (дата обращения 18.08.2020).
4. Project «Pele» // Электронный ресурс: [https://en.wikipedia.org/wiki/Project\\_Pele](https://en.wikipedia.org/wiki/Project_Pele) (дата обращения 18.08.2020).
5. Стратегия цифровой трансформации электроэнергетики Российской Федерации // Электронный ресурс: <https://www.digital-energy.ru/wp-content/uploads/2020/04/strategiya-tsifrovoy-transformatsii-elektroenergetiki.pdf> (дата обращения 18.08.2020).
6. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 № 1523-р) // Электронный ресурс: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 18.08.2020).
7. План мероприятий («Дорожная карта») по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет» (утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 № 1526-р). Электронный ресурс: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110001> (дата обращения 18.08.2020).
8. ГОСТ Р 58092.1-2018 Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения. Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/1200159405> (дата обращения 18.08.2020).
9. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Умная энергетика. Термины и определения. Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/437253092> (дата обращения 04.06.2020).
10. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года (утверждены Указом Президента Российской Федерации от 05.03.2020 № 164). Электронный ресурс: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003050019> (дата обращения 18.08.2020).
11. План развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 г. (утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 21.12.2019 № 3120-р). Электронный ресурс: <http://government.ru/docs/38714/> (дата обращения 18.08.2020).
12. Саркисов А.А., Антипов С.В., Смоленцев Д.О., Билашенко В.П., Кобринский М.Н., Сотников В.А., Шведов П.А. Безопасное развитие атомных энергетических технологий в Арктике: перспективы и подходы. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 3. – С. 5-17. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.01>.

13. АЭС малой мощности / модульные реакторы. Электронный ресурс: <https://www.atomic-energy.ru/SMR> (дата обращения 18.08.2020).

14. Саркисов А.А., Смоленцев Д.О., Антипов С.В., Билашенко В.П., Шведов П.А. Экономическая эффективность и возможности применения атомных энергоисточников мегаваттного класса в Арктике. // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 1 (29). – С. 4-14.

15. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-Term Deployment. – [S. 1.]: OECD, 2016. – (NEA No. 7213).

16. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Корнеев А.Г. Оценка электрических нагрузок потенциальных проектов освоения месторождений минерально-сырьевых ресурсов в восточных регионах Арктической зоны Российской Федерации. // Арктика: экология и экономика. – 2020. – № 1 (37). – С. 4-14.

17. Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020. IAEA-TECDOC-1915.

18. Наумов В.А., Гусак С.А., Наумов А.В. Атомные станции малой мощности для энергообеспечения арктических регионов: оценка радиоактивности отработавшего ядерного топлива. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – №1. – С. 75-86. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.08>.

Поступила в редакцию 20.08.2020 г.

#### Авторы

Саркисов Ашот Араkelович, советник РАН, академик, профессор, д-р техн. наук  
E-mail: [sarkisov@ibrae.ac.ru](mailto:sarkisov@ibrae.ac.ru)

Антипов Сергей Викторович, заместитель директора, д-р техн. наук  
E-mail: [santipov@ibrae.ac.ru](mailto:santipov@ibrae.ac.ru)

Смоленцев Дмитрий Олегович, научный сотрудник  
E-mail: [dsmol@ibrae.ac.ru](mailto:dsmol@ibrae.ac.ru)

Билашенко Вячеслав Петрович, старший научный сотрудник, канд. техн. наук  
E-mail: [bilvp@ibrae.ac.ru](mailto:bilvp@ibrae.ac.ru)

Кобринский Михаил Натанович, заместитель зав. отделом, канд. физ.-мат. наук  
E-mail: [mnk@ibrae.ac.ru](mailto:mnk@ibrae.ac.ru)

Сотников Владимир Андреевич, инженер, канд. техн. наук  
E-mail: [vasotnikov@mail.ru](mailto:vasotnikov@mail.ru)

Шведов Павел Алексеевич, заместитель зав. отделом  
E-mail: [spa@ibrae.ac.ru](mailto:spa@ibrae.ac.ru)

UDC 621.039.58

## LOW-POWER NUCLEAR POWER PLANTS IN THE CONTEXT OF ELECTRIC POWER SYSTEMS TRANSFORMATION

Sarkisov A.A., Antipov S.V., Smolentsev D.O., Bilashenko V.P., Kobrinsky M.N., Sotnikov V.A., Shvedov P.A.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences  
52, BolshayaTul'skaya Str., Moscow, Russia, 115191

#### ABSTRACT

Increasing economic importance of the Arctic, further intensification of northern sea routes, and exceptional sensitivity of the arctic natural environment to anthropogenic impacts are fundamental factors for a comprehensive study of environmental aspects in the application of innovative technologies for the development

of infrastructure in the Arctic.

Despite the growing interest in low-power nuclear power plants as a distributed generation facility, their possible application in technologically isolated power systems does not lose relevance. The development of both the Arctic and Far Eastern regions of the Russian Federation presents great opportunities and demand for the use of nuclear power sources. Also, development programs for the Russian arctic zone imply a significant increase in the role and number of nuclear power facilities, in other words of potential radiation-hazardous facilities.

Large-scale use of nuclear-powered installations in the Arctic necessitates advanced development of a scientifically grounded and modern forecasting system as well as assessments of threats and risks in case of possible radiation emergencies at nuclear- and radiation-hazardous facilities. Also, the development of proposals for necessary measures to minimize negative consequences of such emergencies is required. This is especially true for the case of compact placement of industrial, infrastructure and residential facilities in the Arctic in the immediate vicinity of nuclear facilities.

The paper demonstrates that the demand for low-power nuclear power plants and their competitiveness will grow steadily in the conditions of electric-power industry decentralization, further spread of distributed generation and the development of technologically isolated power systems. Approaches to the generation of a low nuclear-power system based on the philosophy of industrialization of production and centralized management are presented. Special features of the environmental impact assessment of low-power nuclear power plants for the development of a methodology to study the radio-ecological hazard related problems are provided.

**Key words:** Arctic region, isolation power system, distributed generation, low-power nuclear power plant, development forecast, radiation safety, sea areas, mathematical modeling.

#### REFERENCES

1. *Low-Power Nuclear Power Plants – a New Line in the Development of Power Systems*. Vol. 2. Ed. by akad. RAN A.A. Sarkisov. Moscow. Akadem-Print Publ., 2015, 387 p. (in Russian).
2. Sarkisov A.A. Introductory Paper of the Chairman of the Conference Scientific Committee. *Low-Power Nuclear Power Plants – a New Line in the Development of Power Systems*. Moscow. Nauka Publ., 2011, v. 1, pp. 7-12 (in Russian).
3. Advanced Reactor Demonstration Program. Available at: <https://www.energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies/advanced-reactor-demonstration-program> (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).
4. Project «Pele». Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Project\\_Pele](https://en.wikipedia.org/wiki/Project_Pele) (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).
5. Strategy for Digital Transformation of the Electric Power Industry in the Russian Federation. Available at: <https://www.digital-energy.ru/wp-content/uploads/2020/04/strategiya-tsifrovoy-transformatsii-elektroenergetiki.pdf> (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).
6. Energy Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2035 (approved by the Federal Government on June 9, 2020 No 1523-r). Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).
7. An Action Plan («Roadmap») to Improve Legislation and Eliminate Administrative Barriers for the Implementation of the «ENERGYNET» National Technological Initiative (approved by the Federal Government on June 9, 2020 No 1526-r). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110001> (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).
8. GOST R 58092.1-2018 Electric energy storage (ESS) systems. Terms and definitions. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200159405> (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).

Russian).

9. Preliminary National Standard of the Russian Federation. Information Technology. Smart Energy. Terms and Definitions. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/437253092> (accessed Jun. 06, 2020) (in Russian).

10. Fundamentals of the State Policy of the Russian Federation in the Arctic for the Period up to 2035 (approved by Decree No 164 of the President of the Russian Federation Dated March 05, 2020). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003050019> (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).

11. Infrastructure Development Plan for the Northern Sea Route until 2035 (approved by the Federal Government on Dec. 21, 2019 No 3120-r). Available at: <http://government.ru/docs/38714> (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).

12. Sarkisov A.A., Antipov S.V., Smolentsev D.O., Bilashenko V.P., Kobrinsky M.N., Sotnikov V.A., Shvedov P.A. Safe Development of Nuclear Power Technologies in the Arctic: Prospects and Approaches. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 3, pp. 5-17; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.01> (in Russian).

13. Small Modular Nuclear Power Plants. Available at: <https://www.atomic-energy.ru/SMR> (accessed Aug 18, 2020) (in Russian).

14. Sarkisov A.A., Smolentsev D.O., Antipov S.V., Bilashenko V.P., Shvedov P.A. Economic Efficiency and Possibilities of Using Megawatt-class Nuclear Power Sources in the Arctic. *Arktika: Ecologiya i Ekonomika*. 2018, no. 1 (29), pp. 4-14 (in Russian).

15. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-Term Deployment. [S. 1.]: OECD, 2016. (NEA No. 7213).

16. Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Korneev A.G. Assessment of Electrical Loads of Potential Projects for the Development of Mineral Resources in the Eastern Regions of the Arctic Zone of the Russian Federation. *Arktika: Ecologiya i Ekonomika*. 2020, no. 1 (37), pp. 4-14 (in Russian).

17. Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors. Vienna. International Atomic Energy Agency, 2020. IAEA-TECDOC-1915.

18. Naumov V.A., Gusak S.A., Naumov A.V. Small Nuclear Power Plants for Power Supply to the Arctic Regions: Spent Nuclear Fuel Radioactivity Assessment. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 1, pp. 75-86; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.08> (in Russian).

### Authors

Sarkisov Ashot Arakelovich, Advisor of Russian Academy of Sciences, Academician, Professor, Dr. Sci. (Engineering)  
E-mail: [sarkisov@ibrae.ac.ru](mailto:sarkisov@ibrae.ac.ru)

Antipov Sergey Viktorovich, Deputy Director, Dr. Sci. (Engineering)  
E-mail: [santipov@ibrae.ac.ru](mailto:santipov@ibrae.ac.ru)

Smolentsev Dmitry Olegovich, Researcher  
E-mail: [dsmol@ibrae.ac.ru](mailto:dsmol@ibrae.ac.ru)

Bilashenko Vyacheslav Petrovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)  
E-mail: [bilvp@ibrae.ac.ru](mailto:bilvp@ibrae.ac.ru)

Kobrinsky Mikhail Natanovich, Deputy Head of Department, Cand. Sci. (Phys.-Math.)  
E-mail: [mnk@ibrae.ac.ru](mailto:mnk@ibrae.ac.ru)

Sotnikov Vladimir Andreevich, Engineer, Cand. Sci. (Engineering)  
E-mail: [vasotnikov@mail.ru](mailto:vasotnikov@mail.ru)

Shvedov Pavel Alekseevich, Deputy Head of Department  
E-mail: [spa@ibrae.ac.ru](mailto:spa@ibrae.ac.ru)