

Рассматривается современное состояние и актуальные вопросы построения энергетической инфраструктуры Российской Арктики и ее защиты в условиях воздействия экстремального климата. Анализируются инфраструктурные проекты, реализованные в арктических регионах России в рамках концепции «энергетического перехода». Подчеркивается важность учета климатических и экологических факторов, рекреационный характер места и необходимость поиска новых решений в противодействии современным климатическим вызовам. Обсуждаются возможности реализации новых подходов в сфере проектирования объектов капитального строительства, основанные на интеллектуально-цифровых системах строительного и энергетического моделирования и их роль в повышении устойчивости энергетической инфраструктуры региона.

Ключевые слова: Российская Арктика; устойчивое развитие; среда обитания; климат; экология; туризм; информационное моделирование; энергетическое моделирование. /

The current state and topical issues of building the energy infrastructure of the Russian Arctic and its protection under the influence of an extreme climate are considered. Infrastructure projects implemented in the Arctic regions of Russia within the framework of the “energy transition” concept are analyzed. The importance of considering climatic and environmental factors, the recreational nature of the place and the need to search for new solutions in countering modern climatic challenges are emphasized. The authors also discuss the possibilities of implementing new approaches in the design of capital construction projects based on intelligent-digital systems of construction and energy modeling, as well as their role in increasing the sustainability of the energy infrastructure of the region.

Keywords: Russian Arctic; sustainable development; environment; climate; ecology; tourism; information modeling; energy modeling.

Климатические изменения и энергетическая инфраструктура в Российской Арктике / Climatic changes and the energy infrastructure in the Russian Arctic

текст

Дмитрий Соловьев
Институт океанологии
имени П. П. Ширшова РАН
Любовь Шилова
НИУ Московский
государственный
строительный университет

Ольга Разоренова
Институт океанологии
имени П. П. Ширшова
РАН /

text

Dmitry Solovyev
P. P. Shirshov Institute of
Oceanology RAS
Liubov Shilova
Moscow State University of
Civil Engineering
Olga Razorenova
P. P. Shirshov Institute of
Oceanology RAS

1. Проблемы климатических изменений и устойчивость энергетической инфраструктуры в Российской Арктике

Не секрет, что арктический регион является уникальным в первую очередь из-за температурного режима и климата, который формируется в условиях ограниченного поступления солнечного тепла по сравнению с неполярными регионами и во многом определяется количеством тепла, приносимого океанскими течениями и воздушными потоками из низких географических широт [1; 2].

Таким образом, в Арктике формируются климатические условия с экстремально холодными зимами на севере Сибири и более мягким климатом на севере европейской части России. Относительно мягкие климатические условия на севере европейской части России в Арктике определили активное промышленно-хозяйственного освоение этого региона, разработку полезных ископаемых, формирование крупных городских агломераций, создание развитой энергетической инфраструктуры, обеспечивающей хозяйственную деятельность, электро- и теплоснабжение промышленного и бытового секторов. Энергетическая инфраструктура представлена преимущественно ТЭЦ в населенных пунктах, газотурбинными станциями в местах добычи полезных ископаемых, дизель-генераторами в небольших поселках [3; 4]. Сектор передачи электроэнергии практически неразвит в связи с высокой стоимостью строительства ЛЭП в экстремальных климатических условиях на оттаивающих в летний период многолетне-мерзлотных грунтах. На существующих ЛЭП необходимо контролировать состояние с помощью приборов на предмет возможного обмерзания проводов и принимать меры в виде установки ветряных турбин, нейтрализующих обледенение. Этот способ защиты уже успешно применялся на Сахалине. Специфика региона требует оптимизации энергосистемы с целью обеспечения безопасности и минимизации больших потерь из-за климатических рисков [4–6]. Проблема особенно актуальна в связи с программой развития атомной энергетики в Арктике. Плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов» заменила Билибинскую АЭС. Теплоэлектростанция состоит из береговой инфраструктуры и плавучего энергоблока, который оснащен двумя

реакторами мощностью 35 мегаватт каждый. В 2020 г. плавучая атомная тепловая электростанция (ПАТЭС) дала первую электроэнергию в изолированную сеть Чаун-Билибинского узла Чукотского автономного округа (рис. 1а, б). Создание новой плавучей тепловой атомной электростанции в Певеке позволит осуществить первые значительные шаги на пути социально-экономического развития Чаунского муниципального района и всей Чукотки. Кроме того, эта станция станет одним из ключевых инфраструктурных компонентов программы развития Северного морского пути и успешной организации круглогодичной ледокольной проводки.

Анализ рисков развития энергетической инфраструктуры в АЗРФ показал, что климатические риски стоят на одном из первых мест [7; 8]. Учитывая условия эксплуатации, плавучая станция спроектирована с большим запасом прочности.

2. Реализация концепции «энергетического перехода» и энергетическое моделирование как ответ на климатические вызовы

Концепция «энергетического перехода» не нова и означает структурное изменение в мировом энергетическом балансе с сокращением доли определенного вида топлива на 10% за 10 лет [9]. За свою историю человечество уже прошло три фазы трансформации топливно-энергетического комплекса. Первая – это переход от биомассы к углю; вторая – от угля к нефти и, наконец, третья – от нефти к газу. Сейчас мы находимся на пороге четвертого энергетического перехода, главной особенностью которого является более широкое использование низкоуглеродных и полностью безуглеродных источников энергии и в особенности широкое применение возобновляемых источников энергии. Одним из основных факторов, способствующих таким изменениям, является желание промышленно развитых стран декарбонизировать мировую экономику и уменьшить свою зависимость от поставок энергоносителей из-за рубежа. Рассматривая вопросы развития энергетической инфраструктуры АЗРФ в контексте «энергетического перехода», прежде всего необходимо уделять внимание влиянию экологических факторов.

Работа выполнена в рамках госзадания №0128-2021-0003 / Acknowledgements: This work was undertaken within State Assignment No. 0128-2021-0003

1. Climate Change Problems and Sustainability of Energy Infrastructure in the Russian Arctic

It is not a secret for anyone that the Arctic region is unique, first, due to the temperature regime and climate, which is formed in conditions of a limited supply of solar heat in comparison with non-polar regions and is largely determined by the amount of heat brought by ocean currents and air streams from low geographic latitudes (Tilinina et al., 2018; Sherstyukov, 2016).

Thus, climatic conditions are formed in the Arctic with extremely cold winters in the north of Siberia, and a milder climate in the north of the European part of Russia. The relatively mild climatic conditions in the north of the European part of Russia in the Arctic determined the active industrial and economic development of this region, the development of minerals, the formation of large urban agglomerations, the creation of a developed energy infrastructure that provides economic activity, electricity and heat supply to the industrial and domestic sectors. The energy infrastructure is represented mainly by thermal power plants in settlements, gas turbine stations in places of mining, diesel generators in small villages (Morgunova et al., 2019; 2020). The power transmission sector is practically undeveloped due to the high cost of building power lines in extreme climatic conditions on permafrost

Очевидно, ценность арктического региона определяется уникальными экосистемами и их весомым вкладом в обеспечение баланса и стабильности климата планеты. По последним данным, «вклад российской Арктики в поддержание глобального экосистемного баланса оценивается в 12% от глобального и превышает суммарный вклад всех других стран арктического региона. Около 80% всего видового биоразнообразия северной приполярной части Земли представлено в Российской Арктике» [10]. Важным становится вопрос не только поддержания биологического баланса на планете, но и сохранения традиционной системы управления окружающей средой коренных народов Севера.

При этом экосистемы Арктики зависимы от изменений климатической системы планеты, поэтому состояние окружающей среды во всем макрорегионе также является четким индикатором глобальных изменений. Одним из важных индикаторов изменений климата Арктики является Карское море непосредственно в период его освобождения от зимнего ледового «панциря», что принципиально важно для понимания изменений, происхо-

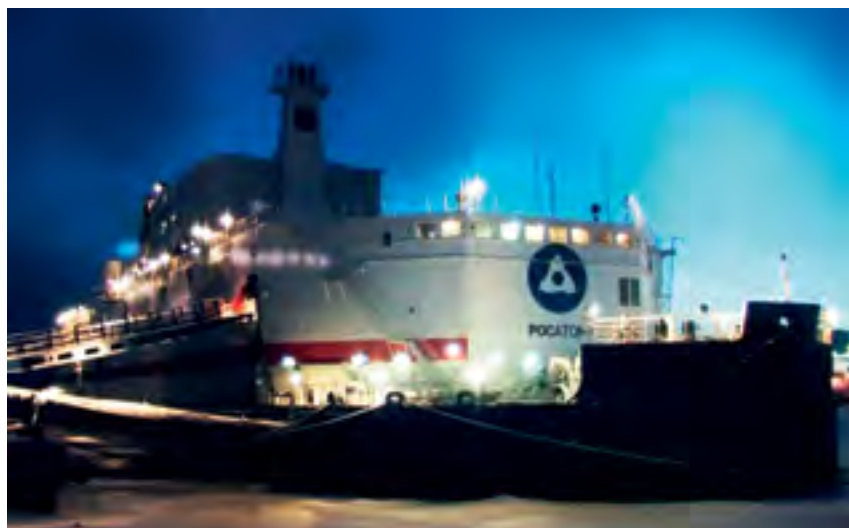
soils thawing in summer. On existing power lines, it is necessary to monitor the condition with the help of instruments for the tendency of possible freezing of wires and take measures in the form of installing wind turbines that neutralize icing. This method of protection has already been successfully used on Sakhalin. The specificity of the region requires development to optimize the power system to ensure safety and minimize large losses due to climatic risks (Morgunova et al., 2020; Perfilyev, 2016; Morgunova, 2021). The problem is especially relevant in connection with the program for the development of nuclear energy in the Arctic. The floating nuclear thermal power plant “Akademik Lomonosov” replaced the Bilibino nuclear power plant. The thermal power plant consists of an onshore infrastructure and a floating power unit, which is equipped with two reactors with a capacity of 35 megawatts each. In 2020, the floating nuclear thermal power plant (FNPP) provided the first electricity to the isolated network of the Chaun-Bilibino node of the Chukotka Autonomous Okrug (Fig. 1a, b). The creation of a new floating thermal nuclear power plant in Pevek will make it possible to take the first significant steps towards the socio-economic development of the Chaunsky municipal district and the whole of Chukotka. In addition, this station will become one of the key infrastructure components of the program for the development of the Northern Sea Route and the

дящих в арктических экосистемах под влиянием текущих климатических процессов (рис. 2а, б).

Высокий геокриологический риск в регионе, особенно в прибрежных районах, является одним из определяющих факторов при составлении прогнозов (дорожной карты) энергетического комплекса в арктической зоне России (АЗРФ). Процессы таяния многолетней мерзлоты требуют глубокого осмысления и изучения их возможного влияния на действующие объекты энергетического комплекса в АЗРФ и на формирование будущей энергетической инфраструктуры. Криолитологические исследования, проведенные в отдельных российских арктических городах, выявили многочисленные примеры повреждения зданий и сооружений на грунтах, подверженных воздействию неблагоприятных условий вечной мерзлоты. Так, за последнее десятилетие в Норильске число повреждений, связанных с таянием вечной мерзлоты, было значительно выше, чем за предшествующие 50 лет [11]. При таянии вечной мерзлоты она превращается в мягкий ил, который может подниматься и опускаться, что приводит к разрушению возведенных на ней зданий и сооружений (рис. 3а, б).

в Рис. 1а. Вид с набережной города Певек. Департамент коммуникаций АО «Концерн «Росэнергоатом». – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2019/12/19/100193> / Fig. 1a. View from the embankment of the town of Pevek. Source: Communications Department of Rosenergoatom Concern JSC

в Рис. 1б. ПАТЭС «Академик Ломоносов». Департамент коммуникаций АО «Концерн «Росэнергоатом». – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2019/12/19/100193> / Fig. 1b. FNPP “Akademik Lomonosov”. Source: Communications Department of Rosenergoatom Concern JSC



successful organization of year-round icebreaker support.

Analysis of the types of risks for the development of energy infrastructure in the Russian Arctic showed that climatic risks are in one of the first places (Otsenochnyi doklad Rosgidrometa o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiiskoi Federatsii, 2017; Nefedova & Solovyev, 2019). In this regard, considering the operating conditions, the floating station was designed with a large margin of safety.

2. Implementation of the concept of “energy transition” and energy modeling as a response to climate challenges

The concept of “energy transition” is not new and means a structural change in the world energy balance with a reduction in the share of a certain type of fuel by 10% over 10 years (Batenin et al., 2017). During its history, mankind has already gone through three phases of transformation of the fuel and energy complex: the first is the transition from biomass to coal, the second is from coal to oil, and, finally, the third is from oil to gas. We are now on the verge of a fourth energy transition, the main feature of which is the increased use of low-carbon and completely carbon-free energy sources, and in particular the widespread use of renewable energy sources. One of the main factors contributing to such changes is the desire of industrialized countries to decarbonize the world economy and reduce their dependence on energy supplies

from abroad. Considering the development of the energy infrastructure of the Russian Arctic in the context of the “energy transition”, first, it is necessary to pay attention to the influence of environmental factors.

It is obvious that the value of the Arctic region is determined by unique ecosystems and their significant contribution to ensuring the balance and stability of the planet’s climate. According to the latest data, “the contribution of the Russian Arctic to maintaining the global ecosystem balance is estimated at 12% of the global and exceeds the total contribution of all other countries in the Arctic region. About 80% of the total species biodiversity of the northern circumpolar part of the Earth is represented in the Russian Arctic” (Pavlenko, 2013). It becomes important not only to maintain the biological balance on the planet, but also to preserve the traditional system of environmental management of the indigenous peoples of the north.

At the same time, the ecosystems of the Arctic are dependent on changes in the climate system of the planet, therefore, the state of the environment in the entire macroregion is also a clear indicator of global changes. One of the important indicators of climate change in the Arctic is the Kara Sea immediately during the period of its release from the winter ice “shell”, which is fundamentally important for understanding the changes occurring in the Arctic ecosystems under the influence of

К 2050 г. от таяния вечной мерзлоты, вызванного изменением климата, может пострадать до 70% инфраструктуры – дома, дороги и трубопроводы – и частично повредить устоявшийся быт и жизни 3,6 миллиона человек. Как утверждает коллектив ученых из России, США, Норвегии и Финляндии, даже если человечество сможет удержать глобальное потепление на уровне 2° С, разрушений не избежать: можно лишь снизить масштаб грозящих нам бедствий [12; 13].

Высокие геоэкологические риски в АЗРФ имеют в качестве следствия значительное усложнение процесса строительства энергообъектов, не только приводя к удорожанию конструкций фундаментов и оснований, но порой и к полному разрушению энергообъектов. Таяние многолетне-мерзлотных грунтов усложняет транспортировку при строительстве энергообъектов. Потепление климата ведет к сокращению сроков возможности доставки частей агрегатов по зимним снежным дорогам в районах, где в летний период подъездные пути практически отсутствуют. Данные природно обусловленные риски могут в несколько раз повышать стоимости страхования объектов энергетической инфраструктуры [15]. Уже сегодня становятся очевидными последствия наблюдаемого потепления в Арктике.

Освоение ресурсов шельфа арктических морей также сильно зависит от климатических условий. Дрейфующий

лед, идущий с моря, айсберги, порывистые ветры и волны могут представлять опасность для горнодобывающих предприятий и транспортных средств. Прогнозируемое изменение климата в арктическом регионе не снизит частоту появления опасных гидрометеорологических воздействий, а только перераспределит степень опасности от различных факторов. Следовательно, с уменьшением вероятности появления плавающего льда увеличивается вероятность увеличения высоты ветрового волнения и появления фрагментов айсбергов от деградирующих ледников на арктических островах. На рис. 4 представлена морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная». Она разработана для работы в экстремальных погодных условиях, отвечает последним требованиям безопасности и способна выдерживать максимальные ледовые нагрузки.

Следует отметить, что в многолетней изменчивости высоты ветрового волнения в Баренцевом море, мониторинг которой ведется с 1958 г., высота волн увеличивается в зимний период на 1,61 м в декабре и на 0,71 м в январе. Если тенденция увеличения высоты волн сохранится, то в будущем увеличение максимальных величин волн вероятно превысит 2,0 м, что превышает среднее значение на 1,2 м, в то время как при проектировании объектов береговой и водной инфраструктуры заложена предельная высота волн 2,3 м [17].

> Рис. 2а. Граница сезонного льда в Карском море. ИО РАН. – URL: <https://ocean.ru/index.php/vse-novosti/item/2148-83-j-rejs-nis-akademik-mstislav-keldysh> <https://ocean.ru/> Fig. 2a. Boundary of seasonal ice in the Kara Sea. Source: IO RAS (<https://ocean.ru>)

> Рис. 2б. Обитатели ледового массива Арктики (Карское море). ИО РАН. – URL: https://ocean.ru/images/news/2021/31_08_21/005.jpg Fig. 2b. Inhabitants of the Arctic ice massif (Kara Sea). Source: IO RAS (<https://ocean.ru>)



current climatic processes (Fig. 2a, b).

The high geocryological risk in the region, especially in the coastal areas, is one of the determining factors in the preparation of forecasts (roadmap) of the energy complex in the Arctic zone of Russia. The melting processes of permafrost require deep understanding and study of their possible impact on the existing facilities of the energy complex in the Russian Arctic and on the formation of the future energy infrastructure. Cryolithological studies carried out in selected Russian Arctic cities have revealed numerous examples of damage to buildings and structures on soils exposed to unfavorable permafrost conditions. So, over the past decade in Norilsk the number of damages associated with the melting of permafrost was significantly higher than in the previous 50 years (Grebenets et al., 2017). When permafrost melts, it turns into soft silt, which can rise and fall, which leads to the destruction of buildings and structures erected on it (Fig. 3, a, b).

By 2050, melting permafrost caused by climate change could affect up to 70% of infrastructure – houses, roads and pipelines – and partially damage the well-established way of life and the lives of 3.6 million people. And, according to a team of scientists from Russia, the USA, Norway and Finland, even if humanity can keep global warming at 2° C, destruction cannot be avoided – we can only reduce the scale of the

disasters that threaten us (Slepchenko et al., 2019; Aalto et al., 2018).

High permafrost risks in the Russian Arctic result in a significant complication of the construction process of power facilities, not only leading to an increase in the cost of foundations and foundations, but also sometimes to the complete destruction of power facilities. Melting of permafrost soils complicates transportation during the construction of power facilities. Climate warming leads to a reduction in the time it takes to deliver parts of the units along snowy winter roads in areas where there are practically no access roads in the summer. These natural risks can increase the cost of insuring energy infrastructure facilities by several times (Nefedova, 2015).

The consequences of the observed warming in the Arctic are already becoming evident.

The development of resources on the shelf of the Arctic seas is also highly dependent on climatic conditions. Drifting sea ice, icebergs, gusty winds and waves can pose a hazard to mining operations and vehicles. The predicted climate change in the Arctic region will not reduce the frequency of occurrence of hazardous hydrometeorological impacts, but will only redistribute the degree of danger from various factors. Consequently, with a decrease in the likelihood of floating ice, the likelihood of an increase in the height of wind waves and the ap-

в Рис. 3а. Таяние вечной мерзлоты вблизи пос. Черский (Якутия). Северо-Восточная научная станция РАН [14]. – URL: https://avatars.mds.yandex.net/get-zen_doc/2355127/pub_5f406662c74ced1782f50c3_5f406821e69d47622e9784b2/scale_1200/

Fig. 3a. Thawing of permafrost near the village Chersky (Yakutia).

Source: (Shcherbina, 2018), North-Eastern Scientific Station of the Russian Academy of Sciences



Во многих прибрежных регионах, в которых ранее были относительно стабильные условия, морской лед, вероятно, станет более динамичным с истончением и уменьшением концентрации, что также необходимо учитывать в экономической деятельности. Планируя добычу полезных ископаемых в Арктике, следует учитывать, что ледяной покров может увеличиваться в некоторых районах Северного Ледовитого океана. По ряду имеющихся оценок, в 2020–2030-х гг. ожидается увеличение ледовой поверхности в западных Баренцевом и Карском морях [17]. В то же время именно в этих морях и в этот же период ожидается значительная интенсификация хозяйственной деятельности, которая будет определяться ростом объемов добычи и транспортировки углеводородов.

Перечисленные климатические вызовы, безусловно, потребуют реализации новых подходов в сфере проектирования объектов капитального строительства (ОКС), основанные на интеллектуально-цифровых системах строительного и энергетического моделирования. В условиях современных климатических изменений для повышения стабильности и надежности энергетической инфраструктуры в Российской Арктике все шире применяются технологии информационно-энергетического



моделирования в строительстве зданий, дорог и объектов энергетики [18–22].

Информационное моделирование «зеленого» строительства (Green BIM) – это применение BIM для оценки энергоэффективности и оценки проектов с точки зрения их соответствия критериям экологичности, безопасности и устойчивого развития. Green BIM также включает в себя применение энергетического моделирования зданий и занимается оптимизацией энергопотребления для повышения энергоэффективности здания наряду с экологически ответственными методами проектирования и строительства в течение его жизненного цикла. Информационное моделирование здания предполагает сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, финансовой и иной информации об объекте со всеми ее взаимосвязями и зависимостями [23]. Эта технология позволяет полностью охватывать все этапы жизненного цикла сооружения – от планирования, составления технического задания, проектирования и анализа и до выпуска рабочей документации, строительства, эксплуатации, ремонта и демонтажа. Использование «зеленых» технологий информационного моделирования в российской Арктике [24] позволит обеспечить эффективное управление данными по планируемому к реализации проектам,

^ Рис. 3б. Строение, подверженное разрушению вследствие таяния вечной мерзлоты. Северо-Восточная научная станция РАН [14]. – URL: https://phototass2.cdnvideo.ru/width/1020_b9261fa1/tass/m2/ Fig. 3b. A structure subject to destruction due to thawing of permafrost. Source: (Shcherbina, 2018), North-Eastern Scientific Station of the Russian Academy of Sciences

pearance of fragments of icebergs from degrading glaciers on the Arctic islands increases. Fig. 4 shows the Prirazlomnaya offshore ice-resistant stationary platform. It is designed to work in extreme weather conditions, meets the latest safety requirements and is able to withstand maximum ice loads.

It should be noted that in the long-term variability of the wind wave height in the Barents Sea, which has been monitored since 1958, the wave height increases in winter from December to January (by 1.61 m in December and by 0.71 m in January). If the trend of increasing wave heights continues, in the future, the increase in maximum wave values will probably exceed 2.0 m, which exceeds the average value by 1.2 m (while the design of coastal and water infrastructure facilities set the maximum wave height of 2.3 m) (Solovyev, 2018).

In many coastal regions that previously had relatively stable conditions, sea ice is likely to become more dynamic with thinning and decreasing concentration, which also needs to be taken into account in economic activity. When planning mining in the Arctic, it should be borne in mind that the ice cover may increase in some areas of the Arctic Ocean. According to a number of available estimates in the 2020-2030s, an increase in the ice surface is expected in the western seas – the Barents and Kara Seas (Solovyev, 2018). At the same time, it is in

these seas and in the same period that a significant intensification of economic activity is expected, which will be determined by an increase in the volume of production and transportation of hydrocarbons.

Thus, the listed climatic challenges will undoubtedly require the implementation of new approaches in the design of capital construction facilities (ACS) based on intelligent digital systems of construction and energy modeling. In the context of modern climatic changes to increase the stability and reliability of the energy infrastructure in the Russian Arctic, information and energy modeling technologies are increasingly used in the construction of buildings, roads and energy facilities (Shilov et al., 2021; Vignali et al., 2021; Chen, 2018; Bonenberg & Wei, 2015; Ebrahim & Wayal, 2019).

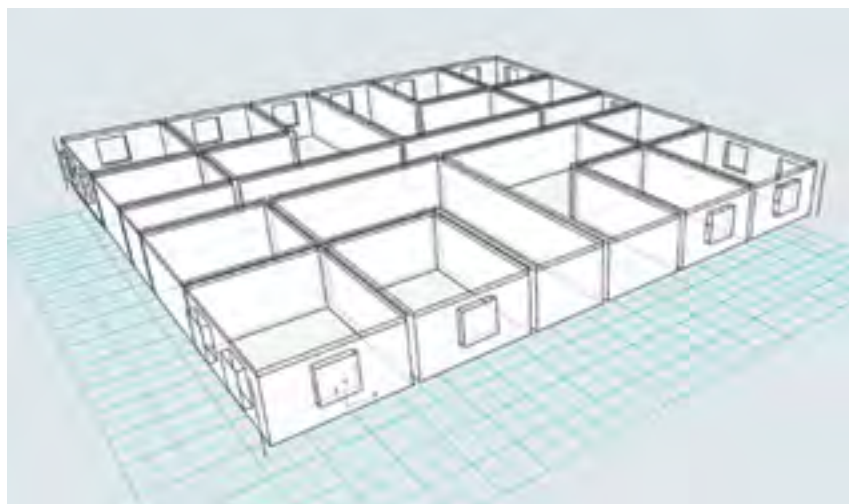
Green Building Information Modeling (Green BIM) is the application of BIM to assess energy efficiency and evaluate projects in terms of their compliance with environmental, safety and sustainable development criteria. Green BIM also includes energy modeling applications for buildings and focuses on energy optimization to improve the energy efficiency of a building along with sustainable design and construction practices throughout its life cycle. Building information modeling involves the collection and integrated processing in the design process of all architectural, engineering, technological, financial and other in-

в Рис.4. Платформа «Приразломная» в условиях экстремальной ледовой нагрузки [16].
– URL: <https://cont.ws/uploads/pic/2018/3/maxresdefault%20%28100%29.jpg> /
Fig. 4. Prirazlomnaya platform under extreme ice load conditions. Source: (Kachurak, 2018)



formation about an object with all its interconnections and dependencies (Ginzburg et al, 2016). This technology allows you to fully cover all stages of the structure's life cycle: from planning, drawing up technical specifications, design and analysis, and to the release of working documentation, construction, operation, repair and dismantling. The use of "green" information modeling technologies in the Russian Arctic (Younis et al., 2020) will ensure effective data management on projects planned for implementation, and their undoubted advantage is the ability to check and evaluate various design solutions of an object before the start of construction work, which can significantly reduce possible financial and time losses (Fig. 5a, b).

With the help of special software, the use of these technologies also makes it possible to evaluate the energy efficiency of the construction site of the object to create a three-dimensional energy model, including modeling. To model the energy consumption and energy efficiency of a building, a mathematical model is used, which should contain an architectural model associated with the engineering systems of the building. This relationship is embedded in the algorithm for calculating specialized software (Fig. 5 b, c). The use of 3D Green BIM modeling technologies is necessary, since in the Arctic climate, wind speed and direction are the main factors affecting permafrost melting due to the transfer



^ Рис. 5а. Пример 3D-информационной модели типового этажа объекта капитального строительства. Данные авторов / Fig. 5a. An example of a 3D information model of a typical floor of a capital construction object. Source: Authors' data

а их безусловным преимуществом является возможность проверки и оценки различных конструктивных решений объекта до начала строительных работ, что позволит значительно сократить возможные финансовые и временные потери (рис. 5а).

В частности, с помощью специального программного обеспечения использование этих технологий также позволяет оценивать энергоэффективность строительной площадки объекта для создания трехмерной энергетической модели, включая моделирование. Для моделирования энергопотребления и энергоэффективности здания используется математическая модель, которая должна содержать архитектурную модель, связанную с инженерными системами здания. Такая взаимосвязь заложена в алгоритме расчета специализированного программного обеспечения (рис. 5б, в). Применение технологий 3D Green BIM моделирования необходимо, так как в арктическом климате скорость и направления ветра являются главным фактором, влияющим на таяние вечной мерзлоты за счет передачи тепла из внутренних частей зданий к земле. Высота здания над землей также существенно влияет на теплоотдачу к слою вечной мерзлоты [24]. Ис-

пользование методов 3D-информационного и энергетического моделирования обеспечивает лучшее понимание взаимосвязи между зданием и вечной мерзлотой, а также предлагает стратегии адаптации к уникальному арктическому климату.

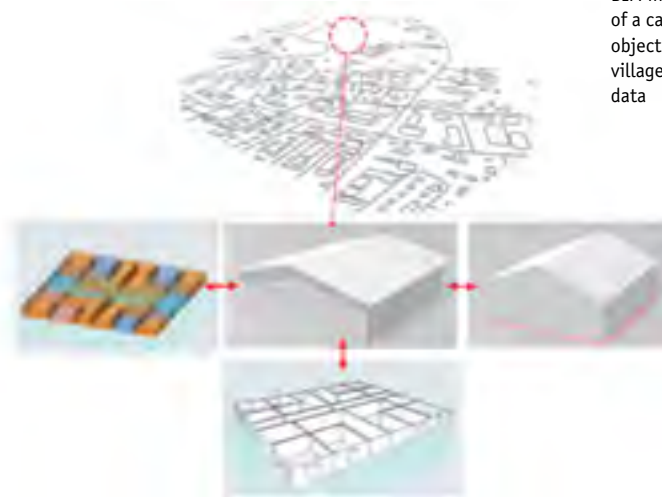
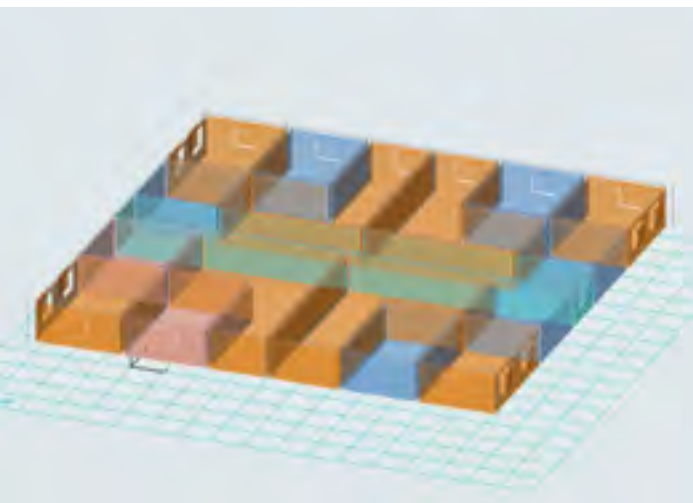
Выводы

Российская часть Арктики характеризуется высокой степенью сохранности и чистотой природной среды, однако уже сегодня надо принимать меры по ограничению воздействия различных видов хозяйственной деятельности на природу арктических экосистем, животный мир и флору.

Важное место среди этих мер занимает также необходимость выполнения Российской Федерацией своих международных обязательств по охране окружающей природной среды в Арктике. Для защиты природных комплексов Арктики планируется усовершенствовать федеральное и региональное природоохранное законодательство, разработать и ввести в действие экологические нормы и стандарты качества окружающей природной среды, обеспечить контроль за их соблюдением, ввести мониторинг антропогенного и техногенного воздействия

v Рис. 5б. Пример 3D-энергетической модели типового этажа объекта капитального строительства. Данные авторов / Fig. 5b. An example of 3D energy model of a typical floor of a capital construction object. Source: Authors' data

v Рис. 5в. Пример отдельных элементов (энергетическая 3D-модель, BIM-модель, упрощенная модель) создания 3D Green BIM информационной модели объекта капитального строительства, расположенного в Арктическом поселке. Данные авторов / Fig. 5c. An example of individual elements (energy 3D model, BIM model, simplified model) of creating a 3D Green BIM information model of a capital construction object located in the Arctic village. Source: Authors' data



of heat from the interior of buildings to the ground. The height of the building above the ground also significantly affects the heat transfer to the permafrost layer (Younis et al., 2020). The use of 3D information and energy modeling techniques provides a better understanding of the relationship between building and permafrost, and suggests adaptation strategies to the unique Arctic climate.

Conclusions

The Russian part of the Arctic is characterized by a high degree of safety and cleanliness of the natural environment, but today it is necessary to take measures to limit the impact of various types of economic activities on the nature of the Arctic ecosystems, fauna, flora.

An important place among these measures is also taken by the need for the Russian Federation to fulfill its international obligations to protect the natural environment in the Arctic. To protect the natural complexes of the Arctic, it is planned to improve federal and regional environmental legislation, develop and introduce environmental norms and standards for the quality of the natural environment, ensure control over their observance, and introduce monitoring of anthropogenic and technogenic impact on the environment. To preserve the natural environment of the Arctic regions, it is necessary to work out the issues of the possibility of introducing a special regime for the use of natural

на окружающую среду. Для сохранения природной среды арктических регионов требуется проработать вопросы о возможности введения особого режима природопользования и жесткой системы экологических ограничений, норм и правил [10; 25]. Очевидно, что данные меры будут способствовать созданию в регионе энергоустановок на возобновляемых источниках энергии для децентрализованного энергоснабжения, газотурбинных станций и атомных станций малой мощности в опорных зонах как более экологически «чистых», удорожая или исключая при этом сооружение энергообъектов на углеводородном топливе, особенно на угле, и использование дизель-генераторов на охраняемых природных территориях. Важно также отметить, что внедряемые современные методы информационно-энергетического моделирования (ИЭМ) ОКС является перспективной технологией, которая позволяет разработать комплекс мероприятий для повышения энергоэффективности зданий и преодоления климатических барьеров в суровых условиях Арктики. Технологии информационного моделирования позволяют создавать конструктивные модели для проведения расчета энергопотребления объектов капитального строительства различного назначения, снижая нагрузку на энергетические системы арктических регионов. Реализация комплекса мер, направленных на повышение устойчивости энергетической инфраструктуры Арктики к климатическим вызовам в первую очередь будет способствовать формированию агломерационно-комфортной среды для постоянного проживания людей и развития экологического туризма.

Литература

1. Tilinina N., Gavrikov A., Gulev S.K. Association of the North Atlantic surface turbulent heat fluxes with midlatitude cyclones // *Monthly Weather Review*. – 2018. – № 11(146). – С. 3691–3715
2. Шерстюков, Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // *Арктика и север*. – 2016. – № 24. – С. 39–67
3. Моргунова, М. О., Нефедова, Л. В., Соловьев, Д. А. Будущее энергетического комплекса Арктической зоны Российской Федерации с точки зрения устойчивого развития // *Семинар вузов по теплофизике и энергетике : материалы Всероссийской научной конференции с международным участием*. – 2019. – С. 280–281

resources and a strict system of environmental restrictions, norms and rules (Pavlenko, 2013; 2015). Obviously, these measures will contribute to the creation in the region of power plants based on renewable energy sources for decentralized power supply, gas turbine plants and low-power nuclear power plants in the support zones, as more environmentally friendly, increasing the cost or excluding the construction of power facilities on hydrocarbon fuel, especially in coal, and the use of diesel generators in protected natural areas. It is also important to note that the introduced modern methods of information and energy modeling (IEM) of the OCS is a promising technology that allows you to develop a set of measures to improve the energy efficiency of buildings and overcome climatic barriers in the harsh Arctic conditions. Information modeling technologies make it possible to create constructive models for calculating the energy consumption of capital construction objects for various purposes, reducing the load on the energy systems of the Arctic regions. It is obvious that the implementation of a set of measures aimed at increasing the sustainability of the energy infrastructure of the Arctic to climatic challenges will primarily contribute to the formation of an agglomeration-comfortable environment for permanent residence of people and the development of ecological tourism.

4. Morgunova, M. O., Solovyev, D. A., Nefedova, L. V., Gabderakhmanov, T. S. Renewable energy in the Russian Arctic: Environmental challenges, opportunities and risks // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – №1565. – С. 012086
5. Порфирьев, Б. Н., Терентьев, Н. Е. Эколого-климатические риски социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации // *Экологический вестник России*. – 2016. – № 1. – С. 32–39
6. Morgunova M. The role of the socio-technical regime in the sustainable energy transition: A case of the Eurasian Arctic // *The Extractive Industries and Society*. 2021. № 3(8). С. 100939. DOI:10.1016/j.exis.2021.100939
7. Оценочный доклад Росгидромета о климатических рисках на территории Российской Федерации. – URL: <https://meteoinfo.ru/novosti/14658-opublikovan-otsenochnyj-doklad-rosgidrometa-oklimaticheskikh-riskakh-na-territorii-rossijskoj-federatsii> (дата обращения: 14.09.2021)
8. Нефедова, Л. В., Соловьев, Д. А. Проблемы и риски использования ВИЭ для развития туризма в арктическом регионе // *Туризм и рекреация: фундаментальные и прикладные исследования: Труды XIV Международной научно-практической конференции. МГУ имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Москва, 25 апреля 2019 года*. – Москва : АНО «Диалог культур». – 2019. – С. 417–424
9. Батенин, В. М., Бушуев, В. В., Воропай, Н. И. *Инновационная электроэнергетика–21*. – Москва : ИЦ «Энергия», 2017
10. Павленко, В. И. Арктическая зона Российской Федерации в системе обеспечения национальных интересов страны // *Арктика: экология и экономика*. – 2013. – № 4. – С. 12
11. Grebenets V., Streletskiy D., Shiklomanov N. Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions // *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*. 2017
12. Slepchenko S.M., Gusev A.V., Svyatova E.O., Hong J.H., Oh C.S., Lim D.S., Shin D.H. Medieval mummies of Zeleny Yar burial ground in the Arctic Zone of Western Siberia // *PLOS ONE*. 2019. № 1(14). С. e0210718. DOI:10.1371/journal.pone.0210718
13. Aalto J., Karjalainen O., Hjort J., Luoto M. Statistical Forecasting of Current and Future Circum-Arctic Ground Temperatures and Active Layer Thickness // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – № 10(45). – С. 4889–4898
14. Щербина, Е. Таяние вечной мерзлоты угрожает российским трубопроводам. 2018. – URL: https://chrdk.ru/news/tayanie_vechnoi_merzloty_ugrozhaet_rossijskim_truboprovodam (дата обращения: 12.09.2021)
15. Nefedova L. V., Solovyev A.A., Shilova L.A., Solovyev D.A. Risk

factors during construction of power plants using renewable energy sources // Vestnik MGSU. 2016. № 12. С. 79–90. DOI:10.22227/1997-0935.2016.12.79-90

16. Качурак, В. Энергетика. "Приразломная" – рукотворный остров. – URL: <https://cont.ws/@predator85vk/886465> (дата обращения: 28.06.2019)

17. Соловьев, Д. А. Изменение климата в российской Арктике и его воздействие на прибрежную инфраструктуру и экономику региона // Морские исследования и рациональное природопользование: Материалы молодежной научной конференции, г. Севастополь, 19–23 сентября 2018 г. – 2018. – С. 369–371

18. Shilov L., Evtushenko S., Arkhipov D., Shilova L. The prospects of information technology using for the analysis of industrial buildings defects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - № 1(1030). - 12039

19. Vignali V., Acerra E.M., Lantieri C., Di Vincenzo F., Piacentini G., Pancaldi S. Building information Modelling (BIM) application for an existing road infrastructure // Automation in Construction. - 2021. - №128 - С. 103752. DOI:10.1016/j.autcon.2021.103752

20. Chen S. A green building information modelling approach: building energy performance analysis and design optimization // MATEC Web of Conferences. 2018. (169). С. 01004. DOI:10.1051/mateconf/201816901004

21. Bonenberg W., Wei X. Green BIM in sustainable infrastructure // Procedia Manufacturing. – 2015. – №3. – С. 1654–1659

22. Ebrahim A., Wayal A.S. Green BIM for Sustainable Design of Buildings // International Conference on Reliability, Risk Maintenance and Engineering Management. – 2019. – С. 185–189.

23. Ginzburg A., Shilova L., Adamtsevich A., Shilov L. Implementation of BIM-technologies in Russian construction industry according to the international experience // Journal of Applied Engineering Science. – 2016. – № 4(14). – С. 457–460

24. Younis M., Kahsay M.T., Bitsuamlak G.T. BIM-cfd integrated sustainable and resilient building design for northern architecture // Ashrae Topical Conference Proceedings. – 2020. – С. 584–591.

25. Павленко, В. И., Меламед, И. И., Куценко, С. Ю., Авдеев, М. А. Формирование контура Арктической зоны Российской Федерации как субъекта управления // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – № 4. – С. 5–11

26. Golubeva E., Tulsakaya N., Tsekina M., Kirasheva N. Ecological tourism in protected natural areas of the Russian Arctic: prospects and challenges // Arctic and North. – 2016. – № 2(23). – С. 66–79. DOI:10.17238/issn2221-2698.2016.23.66

References

Aalto, J., Karjalainen, O., Hjort, J., & Luoto, M. (2018). Statistical Forecasting of Current and Future Circum-Arctic Ground Temperatures and Active Layer Thickness. *Geophysical Research Letters*, 45(4), 4889–4898.

Batenin, V. M., Bushuev, V. V., & Voropay, N. I. (2017). Innovative electric power industry-21. Moscow: ITs Energiya.

Bonenberg, W., & Wei X. (2015). Green BIM in sustainable infrastructure. *Procedia Manufacturing*, 3, 1654–1659.

Chen, S. (2018). A green building information modelling approach: building energy performance analysis and design optimization. *MATEC Web of Conferences*. (169, pp. 01004). DOI:10.1051/mateconf/201816901004.

Ebrahim, A., & Wayal, A. S. (2019). Green BIM for Sustainable Design of Buildings. *International Conference on Reliability, Risk Maintenance and Engineering Management* (pp. 185–189).

Ginzburg, A., Shilova, L., Adamtsevich, A., & Shilov, L. (2016). Implementation of BIM-technologies in Russian construction industry according to the international experience. *Journal of Applied Engineering Science*, 4(14), 457–460.

Golubeva, E., Tulsakaya, N., Tsekina, M., & Kirasheva, N. (2016). Ecological tourism in protected natural areas of the Russian Arctic: prospects and challenges. *Arctic and North*, 2(23), 66–79. DOI:10.17238/issn2221-2698.2016.23.66.

Grebets, V., Streletskiy, D., & Shiklomanov, N. (2017). Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*.

Kachurak, V. (2018, March 18). *Energetika*. "Prirazlomnaya" - рукотворный остров. Power industry. "Prirazlomnaya", a man-made island. Retrieved June 28, 2019, from <https://cont.ws/@predator85vk/886465>

Nefedova, L. V., & Solovyev, D. A. (2019, April 25). Problems and risks of RES development for tourism in the Arctic region. Tourism and recreation: fundamental and applied research: Proceedings of the XIV scientific and practical conference (pp. 417–424). M. V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography. Moscow: ANO Dialog Kultur.

Morgunova, M. (2021). The role of the socio-technical regime in the sustainable energy transition: A case of the Eurasian Arctic. *The Extractive Industries and Society*, 3(8), 100939. DOI:10.1016/j.exis.2021.100939.

Morgunova, M. O., Nefedova, L. V., & Solovyev, D. A. (2019). Budushchee energeticheskogo kompleksa Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii s točki zreniya ustoychivogo razvitiya [The future of energy complex of the Arctic zone of the Russian Federation from the sustainable point of view]. Seminar of higher educational institutions on thermophysics and power: Proceedings of All-Russian conference with international participation (pp. 280–281).

Morgunova, M. O., Solovyev, D. A., Nefedova, L. V., & Gabderakhmanova, T. S. (2020). Renewable energy in the Russian Arctic: Environmental challenges, opportunities and risks. *Journal of Physics: Conference Series*, 1565, 012086.

Nefedova, L. V., Solovyev, A. A., Shilova, L. A., & Solovyev, D. A. (2016). Risk factors during construction of power plants using renewable energy sources. *Vestnik MGSU*, 12, 79–90. DOI:10.22227/1997-0935.2016.12.79-90.

Otsenochnyi doklad Rosgidrometa o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [Roshydromet assessment report on climate risks on the territory of the Russian Federation] (2017). Hydrometcenter of Russia. Retrieved September 14, 2021, <https://meteoinfo.ru/novosti/14658-opublikovan-otsenochnyj-doklad-rosgidrometa-o-klimaticheskikh-riskakh-na-territorii-rossijskoj-federatsii>

Pavlenko, V. I. (2013). Arctic zone of the Russian Federation in the system of national interests of the country. *Arctic: Ecology and Economy*, 4, 12.

Pavlenko, V. I., Melamed, I. I., Kutsenko, S. Yu., & Avdeev, M. A. (2015). Shaping of contour of the Arctic zone of the Russian Federation as a subject of governance. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 4, 5–11.

Perfilyev, B. N., Terentyev, N. E. (2016). Ecologo-klimaticheskie riski sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii [Ecological and climate risks of the social and economic development of the Arctic zone of the Russian Federation]. *Ecologicheskii vestnik Rossii*, 1, 32–39.

Shcherbina, E. (2018). Tayanie vechnoi merzloty ugrozhaet rossiiskim truboprovodam [Melting of permafrost threatens Russian pipelines]. Retrieved September 12, 2021, from https://chrdk.ru/news/tayanie_vechnoi_merzloty_ugrozhaet_rossiiskim_truboprovodam

Sherstyukov, B. G. (2016). The climatic conditions of the Arctic and new approaches to the forecast of the climate change. *Arctic and north*, 24, 39–67.

Shilov, L., Evtushenko, S., Arkhipov, D., & Shilova, L. (2021). The prospects of information technology using for the analysis of industrial buildings defects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1(1030), 12039.

Slepchenko, S. M., Gusev, A. V., Svyatova, E. O., Hong, J. H., Oh, C. S., Lim, D. S., & Shin, D. H. (2019). Medieval mummies of Zeleny Yar burial ground in the Arctic Zone of Western Siberia. *PLOS ONE*, 1(14), e0210718. DOI:10.1371/journal.pone.0210718.

Solovyev, D. A. (2018, September 19–23). Izmenenie klimata v rossiiskoi Arktike i ego vozdeistvie na priblizhnyuyu infrastrukturu i ekonomiku regiona [Climate change in the Russian Arctic and its impact on the coastal infrastructure and economy of the region]. *Morskie issledovaniya i ratsionalnoe prirodoopolzovanie: Proceedings of the Youth scientific conference* (pp. 369–371). Sevastopol.

Tilina, N., Gavrikov, A., & Gulev, S.K. (2018). Association of the North Atlantic surface turbulent heat fluxes with midlatitude cyclones. *Monthly Weather Review*, 11(146), 3691–3715.

Vignali, V., Acerra, E. M., Lantieri, C., Di Vincenzo, F., Piacentini, G., & Pancaldi, S. (2021). Building information Modelling (BIM) application for an existing road infrastructure. *Automation in Construction*, 128, 103752. DOI:10.1016/j.autcon.2021.103752.

Younis, M., Kahsay, M. T., & Bitsuamlak, G. T. (2020). BIM-cfd integrated sustainable and resilient building design for northern architecture. *Ashrae Topical Conference Proceedings* (pp. 584–591).