



Фото: ПАО «Газпром»

Низкоуглеродные решения для автономного энергоснабжения вышек сотовой связи на примере ВСС на полуострове Ямал

Рецензия эксперта на статью получена 01.07.2025 [The expert review of the article was received on July 1, 2025]

Обеспечение связью сегодня стало неотъемлемой частью жизнеобеспечения человечества, мобильной связью в мире пользуются более 4 млрд абонентов. По оценкам [1], в 2024 году в мире насчитывалось 4,93 млн вышек сотовой связи (ВСС), к 2033 году их число вырастет до 5,9 млн. По разным оценкам, число автономных ВСС в мире достигает 650 тыс. штук. В России, по оценкам [2], общее число ВСС превышает 150 тыс. штук (первое место в Европе), число автономных ВСС (оценка авторов на базе планов Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации) в нашей стране может достигать 30 тыс. штук [3]. Энергоснабжение не подключённых к централизованным сетям ВСС в основном обеспечивается за счёт электроэнергии, вырабатываемой дизельной генерацией. Вместе с тем есть альтернативные варианты энергоснабжения ВСС, в которых кроме дизельных электростанций также применяются возобновляемые источники энергии (ВИЭ) — солнечная и ветровая генерация и системы накопления энергии (СНЭ) [4].

Энергопотребление ВСС можно разделить на две составляющие: потребление

основного оборудования базовых станций сотовой связи (БССС) и потребление климатической системы. Основное оборудование БССС выделяет в качестве тепла до $\frac{1}{3}$ от потребляемой им энергии, поэтому климатические системы в основном работают на охлаждение [5]. Оборудование БССС работает на постоянном токе, электроэнергия, как видно на рис. 1, поступает на оборудование с аккумуляторных батарей (напряжение 48 В).

В России оборудование ВСС являются объектами второй категории, до 2013 года нормативная документация предусматривала для всех (сетевых и автономных ВСС) обязательное суточное резервирование энергопотребления по максимальной мощности БССС за счёт накопителей энергии [6]. После 2013 года пункт о резервировании убрали, но до сих пор накопители энергии стоят практически на всех ВСС и на всех ВСС с автономным энергоснабжением.

Поскольку пики потребления БССС в основном приходится на летнее время, когда уровень солнечной радиации высок и потребление климатической системы на охлаждение оборудования БССС максимально, логичным шагом со стороны

УДК 620.9. Научная специальность: 2.4.5.

Низкоуглеродные решения для автономного энергоснабжения вышек сотовой связи на примере ВСС на полуострове Ямал

Элина Талыбовна Мирабталыбова, студентка; Владислав Александрович Карасевич, к.т.н., Российский государственный университет (РГУ) нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (Москва)

Телекоммуникационная отрасль сегодня является одной из важнейших отраслей мировой и российской экономики, мобильной связью в мире пользуются более 4 млрд абонентов. Для обеспечения связи в мире работает почти 5 млн вышек сотовой связи, их число постоянно растёт. Использование ВИЭ и накопителей энергии — распространённая практика для энергоснабжения вышек сотовой связи (ВСС) в России, более 20 лет для энергоснабжения ВСС используется солнечная генерация, на большинстве станций установлены накопители энергии. В статье оценивается целесообразность частичной и полной замены дизельного топлива комбинированным решением на базе ВИЭ и накопителей энергии. В статье на примере ВСС, расположенной на КС-1 «Байдарацкая» в ЯНАО, также рассматривается моделирование энергоснабжения ВСС мощностью 3 кВт с использованием возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, вышки сотовой связи, возобновляемые источники энергии, накопители энергии.

UDC 620.9. Scientific specialty number: 2.4.5.

Low-carbon solutions for autonomous power supply of cellular communication towers on the example of the CCT on the Yamal Peninsula

Elina T. Mirabtalaybova, student; Vladislav A. Karasevich, PhD (Engineering), Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow)

The telecommunications industry is one of the most important sectors of the global and Russian economy today, with more than 4 billion subscribers using mobile communications worldwide. There are almost 5 million mobile towers in the world to provide communications, and their number is constantly growing. The use of renewable energy sources and energy storage devices is a common practice for the power supply of cellular communication towers in Russia. For more than 20 years, solar generation has been used for the power supply of cellular communication towers, and energy storage devices have been installed at most stations. The article evaluates the feasibility of partial and complete replacement of diesel fuel with a combined solution based on renewable energy sources and energy storage devices. Based on the example of the CCT located at the KS-1 "Baydaratskaya" linear compressor station in the Yamalo-Nenets Autonomous District, the article also examines the modeling of power supply to a 3 kW cellular communication tower using renewable energy sources.

Key words: autonomous power supply, cell towers, renewable energy sources, energy storage.

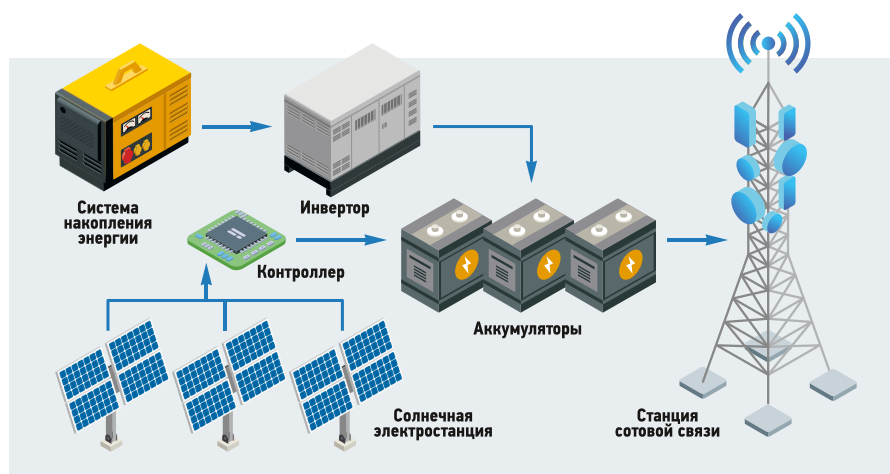


Рис. 1. Типовая схема энергоснабжения вышки сотовой связи



отрасли является использование фотовольтаических панелей, выработка которых также коррелирует с солнечной радиацией. В 2004 году компания «Вымпелком» впервые поставила на изолированную ВСС солнечные панели, сегодня такие решения используются на многих автономных БССС [7]. На некоторых объектах, например, таких, как вышка сотовой связи в посёлке Огоньки Сахалинской области, также расположены небольшие ветровые электростанции, на двух вышках сотовой связи золотодобывающей компании «Полюс» используются водородные системы хранения энергии [5, 8].

Мировой опыт также показывает, что основным решением для автономного энергоснабжения БССС являются гибридные решения на базе солнечной и (или) ветровой генерации, дизельной генерации и аккумуляторных батарей. Решения по проточным Redox-батареям и водородным СНЭ используются крайне редко для регулирования суточной, а не сезонной нагрузки.

Моделирование систем энергоснабжения ВСС

В рамках исследования для общего случая автономного энергоснабжения были рассмотрены пять возможных варианта автономных гибридных энергокомплексов АГЭК (во всех случаях присутствует

система хранения энергии на 24 часа работы оборудования ВСС по максимальной нагрузке). Это следующие варианты:

- дизельная генерация;
- дизельная и солнечная генерация;
- солнечная генерация + аккумуляторы;
- солнечные панели + альтернативные водородный СНЭ;
- солнечные панели + проточная батарея Redox (окислительно-восстановительная).

Мировой опыт показывает, что основным решением для автономного энергоснабжения БССС являются гибридные решения на базе солнечной и (или) ветровой генерации, дизельной генерации и аккумуляторных батарей. Решения по проточным Redox-батареям и водородным СНЭ используются крайне редко

В табл. 1 рассмотрены основные преимущества и недостатки рассматриваемых вариантов. Вариант с использованием дизельного топлива отличается высоким углеродным следом и завязан на внешние поставки дизельного топлива. Вариант ДЭС + СЭС позволяет снизить внешние поставки дизтоплива, однако не позволяет полностью от них отказаться. Варианты СЭС + накопители позволяют рассматривать полностью автономное энергоснабжение ВСС с существенным снижением углеродного следа, однако они более капиталоемкие и целесообразны только при высоких затратах на дизельное топливо.

Для выбора оптимального варианта энергоснабжения БССС в качестве критериев взяты минимальная текущая стоимость электроэнергии и сокращение углеродного следа. В табл. 2 дана оценка авторов по минимальной стоимости электроэнергии, при которых варианты становятся экономически целесообразными.

Сравнение вариантов по минимальной стоимости энергии

табл. 2

Вариант	Минимальная стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	Сокращение выбросов парниковых газов для ВСС 3 кВт** ² , кг-СО ₂ в год
ДЭС + СЭС	20	6909
СЭС + литий	600	16 195
СЭС + Redox*	900	16 195
СЭС + водород	150	16 195

* Цена электроэнергии может быть значительно ниже при изготовлении электролита собственными силами. ** Выбросы парниковых газов посчитаны на основании [9].

Анализ основных вариантов энергоснабжения вышек сотовой связи (ВСС)

табл. 1

Варианты	Преимущества	Недостатки
Дизельная генерация (ДЭС)	✓ Надёжность в любых условиях. ✓ Быстрая установка	✗ Высокие затраты на топливо. ✗ Логистические сложности. ✗ Вредные выбросы CO ₂ . ✗ Полная зависимость от поставок. ✗ Высокий износ оборудования. ✗ Необходимость регулярного технического обслуживания
Дизельная генерация + солнечная генерация (ДЭС + СЭС)	✓ Снижение расхода топлива (до 60 %). ✓ Продление срока службы дизельного генератора. ✓ Уменьшение выбросов и затрат. ✓ Повышенная надёжность	✗ Всё ещё требуется топливо. ✗ Необходимость управления распределением нагрузки
Солнечная генерация + литий-ионные батареи (СЭС + литий)	✓ Низкие эксплуатационные расходы. ✓ Отсутствие вредных выбросов	✗ Высокая стоимость. ✗ Чувствительность к низким температурам. ✗ Ограниченный срок службы
Солнечная генерация + Redox-батареи (СЭС + Redox)	✓ Долговечность и стабильность. ✓ Устойчивость к морозам. ✓ Полный разряд без деградации. ✓ Высокая безопасность	✗ Высокая начальная стоимость. ✗ Необходимость установки ёмкостей для электролита
Солнечная генерация + водородные СНЭ (СЭС + водород)	✓ Полная автономность. ✓ Возможность долгосрочного хранения энергии. ✓ Экологичность, отсутствие выбросов	✗ Высокие капитальные затраты. ✗ Низкий КПД системы (40–50 % по использованию электрической энергии)

В России стоимость электроэнергии на изолированных территориях варьируется от 30 до 3200 руб/кВт·ч, что обусловлено высокой стоимостью доставки топлива и ограниченными возможностями энергоснабжения [10]. Стоимость дизельного топлива составляет от 60 до 500 руб/кг, что вызвано сложной логистикой. В зависимости от стоимости выработки электроэнергии (табл. 2) разные решения по энергоснабжению ВСС становятся экономически рентабельными и могут рассматриваться с других точек зрения, таких как надёжность и автономность энергоснабжения, снижение углеродного следа.

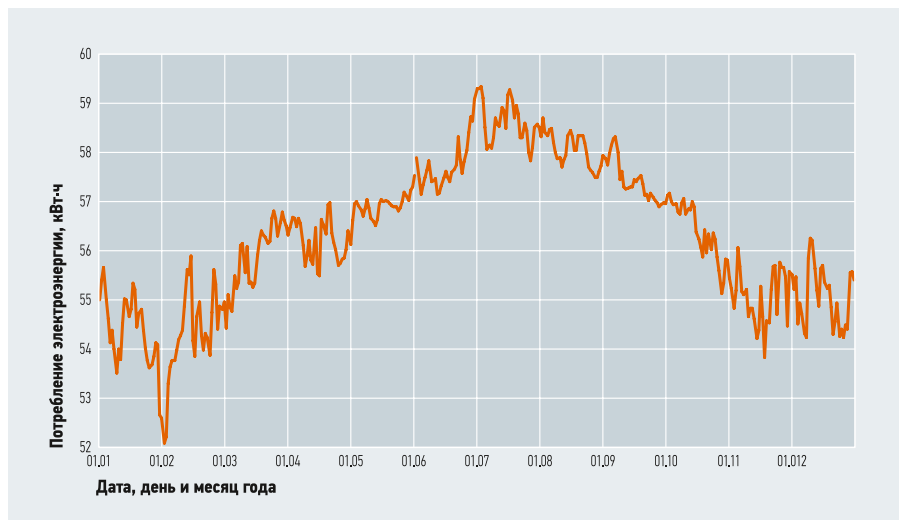


Рис. 2. Потребление электроэнергии оборудования вышки сотовой связи



КС-1 «Байдарацкая» — самая северная в мире. Общая мощность агрегатов — 192 МВт

Пример в ЯНАО

В рамках НИР было проведено моделирование энергоснабжения вышки сотовой связи мощностью 3 кВт, которую расположили в районе линейной компрессорной станции КС-1 «Байдарацкая» магистрального газопровода «Бованенково — Ухта» в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО). Изначально было определено, что оборудование вышки сотовой связи запитано энергией от батареи постоянного тока напряжением 48 В, ёмкости батареи взята 72 кВт·ч (24 часа работы на полной мощности ВСС), рис. 2.

В рамках исследования было принято, что из 3 кВт общей мощности ВСС потребляемая мощность оборудования ВСС составит 2 кВт, а 1 кВт оставлен на работу кондиционера и на резерв. Как видно из рис. 2, суточное потребление энергии в летний период возрастает по сравнению с зимним периодом. Это вызвано необходимостью охлаждения оборудования.

Учитывая, что стоимость дизельного топлива для выбранного объекта относительно невысока (для моделирования она взята 80 руб/кг), варианты с полным отказом от дизельного топлива оказываются экономически нецелесообразными.

Поэтому исходя из табл. 2 был выбран вариант на базе автоматизированного гибридного энергокомплекса (АГЭК) с использованием дизельной и солнечной генерации. Из рис. 3 видно, что в период с апреля по сентябрь солнечная генерация активно участвует в энергобалансе ВСС, в то время как в период с сентября по апрель основная нагрузка приходится на ДЭС. Рассчитано, что при базовом варианте с выработкой электроэнергии от ДЭС в течение года дизельным генератором вырабатывается 20 565,2 кВт·ч электроэнергии при расходе 5141,3 л дизельного топлива (табл. 3). Снижение выбросов парниковых газов при таком варианте составляет 6,9 тонн.

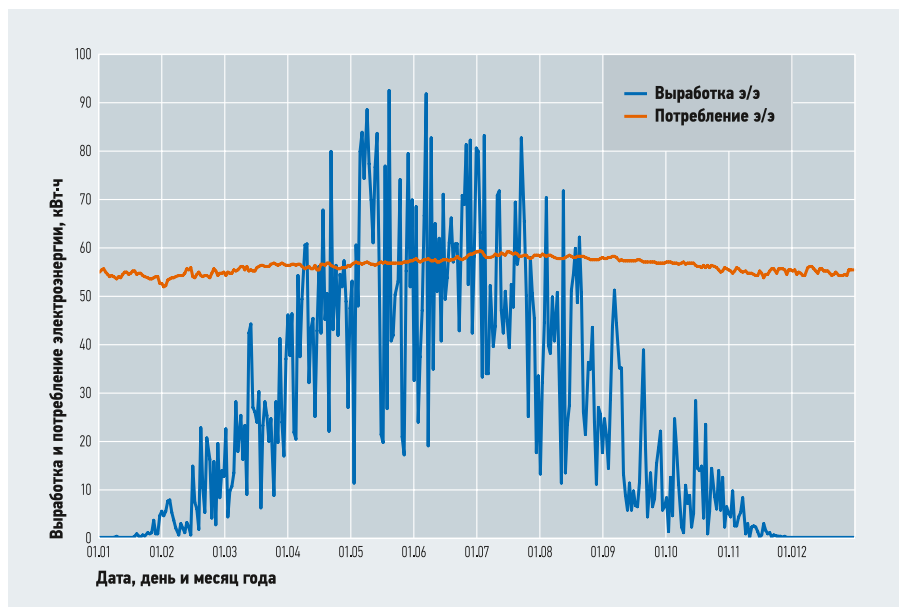


Рис. 3. Выработка электроэнергии солнечной электростанцией (СЭС) гибридной АГЭК

Сравнение вариантов энергоснабжения ВСС КС-1 «Байдарацкая»

табл. 3

Вариант	ДЭС	ДЭС + СЭС
Выработка ДЭС, кВт·ч	20565,2	11791,6
Выработка СЭС, кВт·ч	0	9481,7
Расход дизельного топлива, кг	5141,3	2947,9
Потребление	20565,2	20565,2

Экономические расчёты по проекту

табл. 4

Величина	Цена, руб.
Стоимость одной фотовольтаической панели (500 Вт), руб.	15 000
Стоимость СЭС (в том числе стоимость 25 фотовольтаических панелей / монтаж + доставка), руб.	750 000 (375 000 / 375 000)
Стоимость дизельного топлива, руб/кг	80
Экономия дизельного топлива, кг	2193,4
Экономия, руб/год	175 472
Срок окупаемости без дисконтирования, лет	4,27
Срок окупаемости с дисконтированием (без учёта роста стоимости дизтоплива), лет	6,6

Проведённый в табл. 4 технико-экономический расчёт показывает, что срок окупаемости проекта при принятых в миделе показателях не превышает пяти лет (без учёта дисконтирования и роста стоимости дизельного топлива), а ежегодная экономия за счёт снижения закупок и доставки дизельного топлива составляет 175 472 руб. Годовое снижение выбросов парниковых газов в этом случае составляет 6,9 тонн CO₂-эквивалента.

Выводы

Сегодня связь является важным звеном для обеспечения жизнедеятельности населённых пунктов и промышленных объектов в мире и в России. Связь необходима как для обеспечения безопасности и жизнеобеспечения местного населения, так и для нужд промышленных объектов, в первую очередь для нефтегазовой отрасли. Базовые станции сотовой связи в удалённых районах Крайнего Севера, включая Ямало-Ненецкий автономный округ, зачастую функционируют в условиях полной изоляции от централизованных электрических сетей.

В большинстве случаев электроснабжение таких станций осуществляется с помощью дизельных электростанций (ДЭС). Это объясняется надёжностью технологии, отсутствием необходимости в длительной инсоляции или особых при-

родных условиях. Однако эксплуатация ДЭС в арктическом регионе сопряжена с рядом существенных ограничений, таких как сложная логистика, высокие эксплуатационные расходы и низкая эффективность. В то же время рост внимания к вопросам декарбонизации, развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и водородных технологий открывает новые возможности для создания автономных, устойчивых и низкоуглеродных энергетических систем. Применение солнечных электростанций в сочетании с системами накопления энергии на водороде представляется перспективным направлением для замещения дизельной генерации на объектах базовых станций сотовой связи.

Применение возобновляемых источников энергии и накопителей энергии одновременно с дизельной генерацией

Применение ВИЭ и накопителей энергии одновременно с дизельной генерацией можно считать типовыми решениями для изолированных базовых станций сотовой связи. Вместе с тем примеров по полной замене дизельного топлива на комбинацию «ВИЭ + накопитель энергии» практически нет



можно считать типовыми решениями для изолированных базовых станций сотовой связи. Вместе с тем примеров по полной замене дизельного топлива на комбинацию «ВИЭ + накопитель энергии» практически нет. Это связано с пока ещё высокой стоимостью альтернативных решений, рассмотрение которых может быть целесообразным только при высокой стоимости дизельного топлива.

На примере изолированной БССС в ЯНАО показано, что использование солнечной генерации в телекоммуникационной сфере может давать экономический и экологический эффекты. Это связано с тем, что значительная часть энергии расходуется на охлаждение объектов: расход энергии, как и выработка энергии СЭС, возрастают летом при высоком уровне солнечной радиации. ●

1. Telecom towers market report by type of tower, fuel type, installation, ownership, and region 2025–2033. IMARC. Web-source: imarcgroup.com. Access date: July 5, 2025.
2. TowerXchange's Europe guide. A country-by-country guide to the European tower industry. Telecom Tower Industry of April 21, 2025. Web-source: towerxchange.com. Access date: July 10, 2025.
3. Об утверждении плана деятельности Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации на период 2019–2024 гг.: Приказ Минцифры России от 30.01.2019 №22.
4. Елистратов В.В. Энергоснабжение в Арктике с использованием ВИЭ // Neftegaz.Ru, 2023. №1. С. 74–79.
5. Карасевич В.А., Васильев Ю.В. Применение ВИЭ и водорода на вышках сотовой связи для автономного низкоуглеродного энергоснабжения // Энергетическая политика, 2025. №2. С. 76–81.
6. Об утверждении требований к построению телефонной сети связи общего пользования в части обеспечения надёжности электроснабжения средств связи, выполняющих функции систем коммутации, точек присоединения и базовых станций сетей подвижной связи: Приказ Минсвязи России от 13.03.2007 №32.
7. В сети «Би Лайн GSM» введена в эксплуатацию базовая станция на солнечных батареях [Электр. текст]. «Мобильные телекоммуникации» от 28.09.2004. Режим доступа: mobilecomm.ru. Дата обращ.: 06.07.2025.
8. Презентация генерального директора ООО «Н₂ Чистая энергетика» Алексея Каплуна о деятельности компании / Водородное рождение: Науч.-просвет. конф. (26.12.2024, МГТУ). — М.: Изд-во МГТУ, 2024.
9. Об утверждении методик количественного определения объёмов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов: Приказ Минприроды России от 27.05.2022 №371.
10. Малая гидроэнергетика и гибридные энергокомплексы: организационные схемы и привлечение финансирования: Мат. технол. сессии (23.04.2025, г. Москва, ЦБК «Экспоцентр») / RENWEX 2025.

References — see page 80.



Фото: ПАО «Газпром»

● КС «Пикалевская», входящая в состав газопровода «Грязовец — Выборг»

Low-carbon solutions for autonomous power supply of cellular communication towers on the example of the CCT on the Yamal Peninsula. Pp. 68–71.

Elina T. Mirabalybova, student; Vladislav A. Karasevich, PhD (Engineering), Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow)

1. Telecom towers market report by type of tower (lattice tower, guyed tower, monopole towers, stealth towers), fuel type (renewable, non-renewable), installation (rooftop, ground-based), ownership (operator-owned, joint venture, private-owned, MNO captive), and region 2025–2033. IMARC. Web-source: imarcgroup.com. Access date: July 5, 2025.
2. TowerXchange's Europe guide. A country-by-country guide to the European tower industry. Telecom Tower Industry of April 21, 2025. Web-source: towerxchange.com. Access date: July 10, 2025.
3. *Ob utverzhdenii plana deyatel'nosti Ministerstva tsifrovogo razvitiya, svyazi i massovykh kommunikatsij Rossijskoj Federatsii na period 2019–2024 gg.* [On approval of the activity plan of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation for the period 2019–2024]. *Prikaz Mintsifry Rossii ot 30.01.2019 №22* [Order of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of Russia No. 22 of January 30, 2019]. [In Russian]
4. V.V. Elistratov. *Energosnabzhenie v Arktike s ispol'zovaniem VIE* [Energy supply in the Arctic using renewable energy sources]. *Zhurnal Neftegaz.Ru* ["Neftegaz.Ru" Online-magazine]. 2023. No. 1. Pp. 74–79. [In Russian]
5. V.A. Karasevich, Yu.V. Vasiliev. *Primenenie VIE i vodoroda na vyshkakh sotovoj svyazi dlya avtonomnogo nizkouglerodnogo energosnabzheniya* [Use of renewable energy sources and hydrogen on cell towers for autonomous low-carbon energy supply]. *Energeticheskaya politika* ["Energy Policy" Magazine]. 2025. No. 2. Pp. 76–81. [In Russian]
6. *Ob utverzhdenii trebovanij k postroeniyu telefonnoj seti svyazi obshchego pol'zovaniya v chasti obespecheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya sredstv svyazi, vypolnyayushchikh funktsii sistem kommutatsii, toчек prisoedineniya i bazovykh stantsij setej podvizhnoj svyazi* [On approval of requirements for the construction of a public telephone network in terms of ensuring the reliability of power supply for communications equipment that perform the functions of switching systems, connection points and base stations of mobile communications networks]. *Prikaz Minsvyazi Rossii ot 13.03.2007 №32* [Order of the Ministry of Communications of Russia No. 32 of March 13, 2007]. [In Russian]
7. *V seti "Bi Lajn GSM" vvedena v ekspluatatsiyu bazovaya stantsiya na solnechnykh batareyakh* [A solar-powered base station has been put into operation in the Beeline GSM network]. "Mobil'nye telekommunikatsii" [Mobile Telecommunications] of September 28, 2004. Web-source: mobiletsomm.ru. Access date: July 6, 2025. [In Russian]
8. *Prezentatsiya general'nogo direktora OOO "H2 Chistaya energetika" Alekseya Kapluna o deyatel'nosti kompanii* [Presentation by Alexey Kaplun, General Director of "H2 Clean Energy", LLC, on the company's activities]. *Vodorodnoe rozhdestvo: Pervaya nauch.-prosvet. konf. (26.12.2024, Moscow, MGTU)* [Hydrogen Christmas: The First Annual Scientific and Educational Conference (December 26, 2024, Moscow, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU))]. Moscow. MGTU [BMSTU]. 2024. [In Russian]
9. *Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob'emov vybrosov parnikovykh gazov i pogloshchenij parnikovykh gazov* [On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas absorption]. *Prikaz Minprirody Rossii ot 27.05.2022 №371* [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 37 of May 27, 2022]. [In Russian]
10. *Malaya gidroenergetika i gibridnye energokomplekсы: organizatsionnye skhemy i privlechenie finansirovaniya* [Small hydropower and hybrid energy complexes: organizational schemes and attracting financing]. *Mat. tekhnolog. sessii (23.04.2025, g. Moskva, TsVK "Ekspotsentr")* [Materials of the technological session (April 23, 2025, Moscow, Expocentre Fairgrounds)]. REN-WEX 2025. [In Russian]