

Обзорная статья / Review article
УДК 621.583 + 620.92: 624.131.2
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-16



Современные тенденции использования низкопотенциальной тепловой энергии Земли в целях устойчивого развития

Валерий Р. Волошин¹, Константин В. Белов¹, Мин Оак Со¹, Людмила В. Боронина²

¹Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

Контактное лицо

Валерий Р. Волошин, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ); 117997 Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23.
Тел. +79254144441
Email voloshinvr@mgri.ru
ORCID <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>

Формат цитирования

Волошин В.Р., Белов К.В., Мин Оак Со, Боронина Л.В. Современные тенденции использования низкопотенциальной тепловой энергии Земли в целях устойчивого развития // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 167-177.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-16

Получена 21 августа 2025 г.

Прошла рецензирование 15 октября 2025 г.

Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: рассмотреть современные тенденции в области использования низкопотенциальной тепловой энергии Земли посредством геотермальных теплонасосных систем (ГТСТ), обобщить их преимущества, проблемы и перспективы внедрения в России.

В статье приведён анализ принципов работы и конструктивных решений геотермальных систем, рассмотрены критерии эффективности, термодинамические основы, а также геоэкологические риски и преимущества их эксплуатации. Показано, что использование ГТСТ способствует снижению выбросов парниковых газов, уменьшению эффекта «теплового острова» в городах и улучшению качества атмосферного воздуха. Особое внимание уделено вопросам нормативного регулирования, технологическим барьерам и методам минимизации геоэкологических рисков при проектировании систем. Отмечена высокая энергоэффективность и экологическая устойчивость технологии, при этом указаны факторы, ограничивающие её широкое внедрение в России.

Геотермальные теплонасосные системы являются ключевым элементом устойчивой энергетической трансформации, способствуя декарбонизации, оптимизации теплового баланса и формированию экологически безопасной городской среды. Необходима разработка национальных стандартов, стимулирующих мер и интеграция ГТСТ в гибридные энергетические комплексы.

Ключевые слова

Геотермальные теплонасосные системы, низкопотенциальная энергия, возобновляемые источники, энергоэффективность, устойчивое развитие, тепловой насос, экологическая безопасность.

Modern trends in the utilisation of low-grade geothermal energy for sustainable development

Valeriy R. Voloshin¹, Konstantin V. Belov¹, Min Oak So¹, Lyudmila V. Boronina²

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

²Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Principal contact

Valeriy R. Voloshin, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University;
23 Miklukho-Maklaya St, Moscow, Russia 117997.
Tel. +79254144441

Email voloshinvr@mgri.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>

How to cite this article

Voloshin V.R., Belov K.V., Min Oak So, Boronina L.V.
Modern trends in the utilisation of low-grade geothermal energy for sustainable development.
South of Russia: ecology, development. 2025;
20(4):167-177. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-16

Received 21 August 2025

Revised 15 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

To review current trends in the use of low-grade geothermal energy of the Earth through geothermal heat pump systems (GHPS), summarising their advantages, challenges and implementation prospects in Russia.

The article analyses the principles and structural designs of geothermal systems, performance criteria, thermodynamic aspects and environmental risks. It demonstrates that the use of GHPS reduces greenhouse gas emissions, mitigates the urban heat island effect and improves air quality. Particular attention is paid to regulatory issues, technical barriers and strategies for minimising geoecological risks during system design. The technology's high energy efficiency and environmental sustainability are highlighted, along with key factors constraining its large-scale adoption in Russia.

Geothermal heat pump systems are a cornerstone of sustainable energy transition, promoting decarbonisation, optimisation of heat balance and the creation of environmentally safe urban environments. Developing national standards, incentives and integrating GHPS into hybrid energy systems are considered necessary.

Key Words

Geothermal heat pump systems, low-grade energy, renewable energy, energy efficiency, sustainable development, heat pump, environmental safety.

ВВЕДЕНИЕ

В современной энергетике всё чаще используют возобновляемые источники. Особенно выделяется геотермальная энергия из верхних слоёв земли, которую получают с помощью геотермальных теплонасосных систем теплоснабжения (ГТСТ). Основное преимущество геотермальной энергии из верхних слоёв земли — она есть почти везде, в отличие от гидротермальных источников, которые встречаются только в определённых местах (районы современной тектонической активизации, горно-складчатые области, районы современного вулканизма). Эти системы могут генерировать тепло, и вырабатывать холод для зданий: осуществлять отопление, подавать горячую воду, бороться с гололёдом на тротуарах и дорогах [1].

В основном геотермальную энергию используют для отопления и охлаждения через ГТСТ. На эти системы приходится большая часть всей геотермальной мощности в мире. С 1995 года популярность ГТСТ растёт по ряду причин. Прежде всего из-за их экономической эффективности и экологичности [1–5].

Анализируя данные, приведенные на рис. 1, видно, что использование геотермальных тепловых насосов растёт высокими темпами. К концу 2020 года эти насосы по всему миру произвели около 600 000 ТДж энергии в год. Это намного больше, чем в 2015 и 2010 годах [2] (рис. 1).

В последние 30 лет ГТСТ стали популярнее, потому что они помогают экономить энергию при отоплении и охлаждении зданий, а ещё уменьшают выбросы углекислого газа.

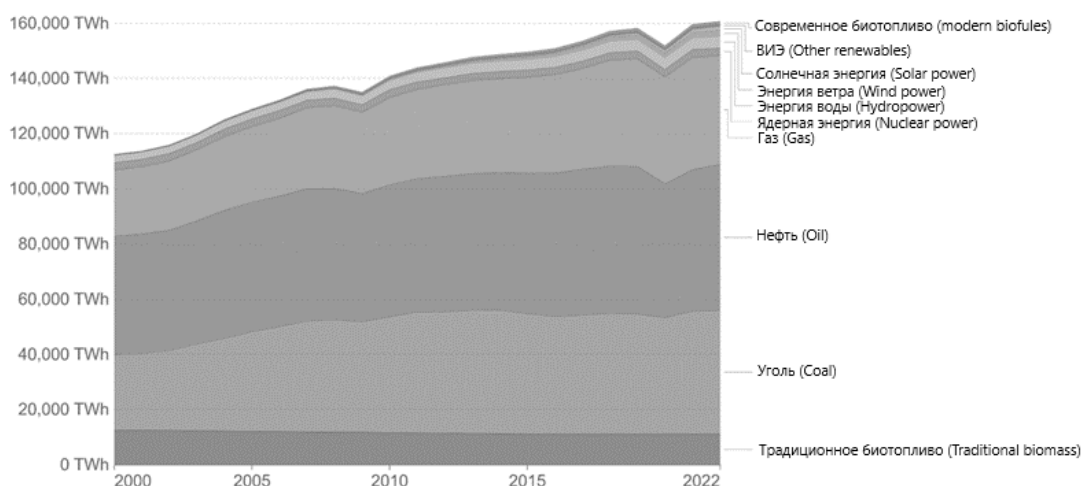


Рисунок 1. Использование тепловых ресурсов

Figure 1. Use of thermal resources

На сегодняшний день мировым лидером по использованию ГТСТ является Китай — установленная мощность установок достигла 30000 МВт, при годовой выработке 240 ТДж.

Установленная мощность ГТСТ в США составляет 20000 МВт при объеме годовой выработки 150000 ТДж. Развитие систем ГТСТ поддерживается государственной политикой и длительной историей популяризации технологии.

Швеция (10000 МВт, 60000 ТДж) и Германия (8000 МВт, 25000 ТДж) показывают эффективность

использования установленных мощностей, что свидетельствует о высоком уровне в проектировании систем, ориентированных на покрытие базовой тепловой нагрузки.

Финляндия (300 МВт, 1962 ТДж) и Австрия (228 МВт, 1094 ТДж) демонстрируют, что даже страны без внушительных общих мощностей могут достигать высоких показателей по удельному производству энергии, что говорит о высокой культуре эксплуатации и оптимальном режиме работы систем.

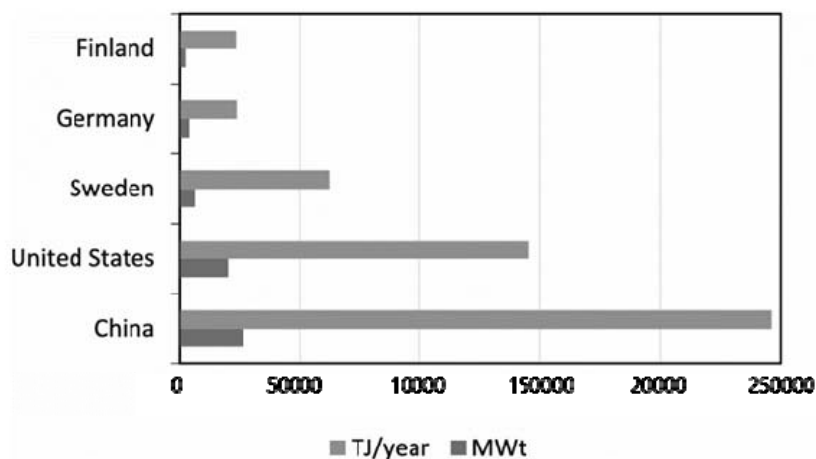


Рисунок 2. Потребления и установленной мощности

Figure 2. Consumption and installed capacity

Показатели России (1,2 МВт, 11,5 ТДж) и ряда других стран Восточной Европы указывают на наличие значительного нереализованного потенциала для внедрения данной технологии [1–13].

Прогнозируется дальнейшее увеличение количества ГТСТ в мире и рост их вклада в удельное производство энергии.

ОБСУЖДЕНИЕ

В современной мировой энергетике наблюдается устойчивая тенденция к расширению использования возобновляемых источников энергии. Среди них выделяется низкопотенциальная тепловая энергия поверхностных слоев Земли, которую получают посредством геотермальных теплонасосных систем (ГТСТ). Ключевое преимущество этого направления заключается в его практически повсеместной доступности, в отличие от «прямого» использования высокопотенциальных гидротермальных ресурсов, привязанных к специфическим геологическим регионам [6–13].

Любая геотермальная теплонасосная система теплоснабжения включает в себя четыре компонента:

1. Оборудование потребителя тепла: системы отопления, радиаторы, теплые полы, бойлеры для горячего водоснабжения.
2. Оборудование потребителя холода: системы кондиционирования воздуха, вентиляции, чиллеры.
3. Теплонасосное оборудование: основной компонент системы, преобразует низкопотенциальную энергию в высокопотенциальную. Наиболее распространены парокомпрессионные машины, также используются абсорбционные, электрохимические и термоэлектрические аналоги.
4. Система сбора низкопотенциального тепла: грунтовый теплообменник, который извлекает энергию из земных недр или сбрасывает избытки тепла/холода обратно в грунт.

Теплонасосные установки являются устройствами, которые способны передавать тепловую энергию от низкопотенциального источника, к телу, имеющим более высокий тепловой потенциал. Согласно второму закону термодинамики, тепловая энергия, без затрат внешних сил, может переходить исключительно от более нагретого тела к менее нагретому. Поэтому, для осуществления цикла работы тепловой машины, необходимы дополнительные затраты энергии (прежде всего, электрической для работы компрессора). Процесс передачи тепла в обратном температурном напоре направлении, осуществляется в обратном цикле. С термодинамической точки зрения, теплонасосная установка — это тепловая машина, цикл работы которой схож с циклом работы холодильной машины, однако является обратным направленным. [5; 6; 12–13]

Принцип работы теплонасосного оборудования

Устройство, принципиально, состоит из тех же самых элементов, что и холодильная машина (рис. 3):

- Теплообменник-испаритель (1), с помощью которого производится отбор тепла от источника с низким потенциалом тепла;
- Контур, который осуществляет термодинамический цикл (электрический компрессор, дроссель) (2,4);

- Теплообменник-конденсатор (3), где осуществляется отдача тепловой энергии хладагента внешнему источнику.

На участке 1 (испаритель) хладагент (легкокипящая жидкость, фреон) получает тепло (Q_1) от внешнего низкопотенциального источника, при этом, происходит его расширение и полное испарение жидкой фазы хладагента. Затем на участке 2 (электрический компрессор), происходит сжатие хладагента, в результате которого давление и температура резко повышаются. Далее, происходит подача перегретого пара с достаточно высокой температурой на участок 3 (конденсатор), где происходит сначала изобарическое охлаждение пара до сухого насыщенного состояния, затем по адиабатическому принципу происходит конденсация хладагента до жидкого состояния, отдавая при этом тепловую энергию (Q_2) внешнему источнику. Впоследствии, хладагент подается на участок 3 (дроссель), при прохождении которого снижается давление и температура хладагента. Дросселирование происходит почти по адиабатному принципу. Потом, хладагент, имеющий температуру ниже, чем низкопотенциальный источник тепла подается на участок 1 (испаритель), где термодинамический цикл завершается [5; 14–18] (рис. 3).

В основу работы теплонасосной установки положены следующие физические принципы:

1. Поглощение и выделение тепловой энергии при фазовом переходе от одного агрегатного состояния к другому.
2. Изменение температуры фазового перехода от давления.

Критерии эффективности и термодинамические основы
Основным показателем, характеризующим эффективность работы теплового насоса, является коэффициент трансформации (или преобразования) энергии COP (Coefficient of Performance). Для идеального термодинамического цикла Карно он определяется формулой [11–13]:

$$COP = \frac{T_0}{T_0 - T_n}$$

где:

- T_0 — абсолютная температура (в Кельвинах), на которую тепло отводится в систему отопления;
- T_n — абсолютная температура (в Кельвинах) низкопотенциального источника тепла.

Физический смысл COP заключается в том, что он показывает, сколько единиц полезной тепловой энергии производится на каждую единицу затраченной электрической энергии. Реальный коэффициент трансформации всегда ниже идеального из-за неизбежных потерь. Он корректируется коэффициентом η , который интегрирует в себя степень термодинамического совершенства системы, учитывая:

- Потери в компрессоре (трение, электрохимические потери).
- Потери в теплообменных аппаратах (испарителе и конденсаторе).
- Энергозатраты на работу вспомогательного оборудования (циркуляционные насосы, автоматика).
- Неидеальность термодинамических свойств хладагентов.

Исследования и практика показывают, что величина η для современных систем варьируется в

широких пределах (от 0.2 до 0.75) и сильно зависит от типа условий эксплуатации [11–13].
и мощности компрессора, качества его изготовления и

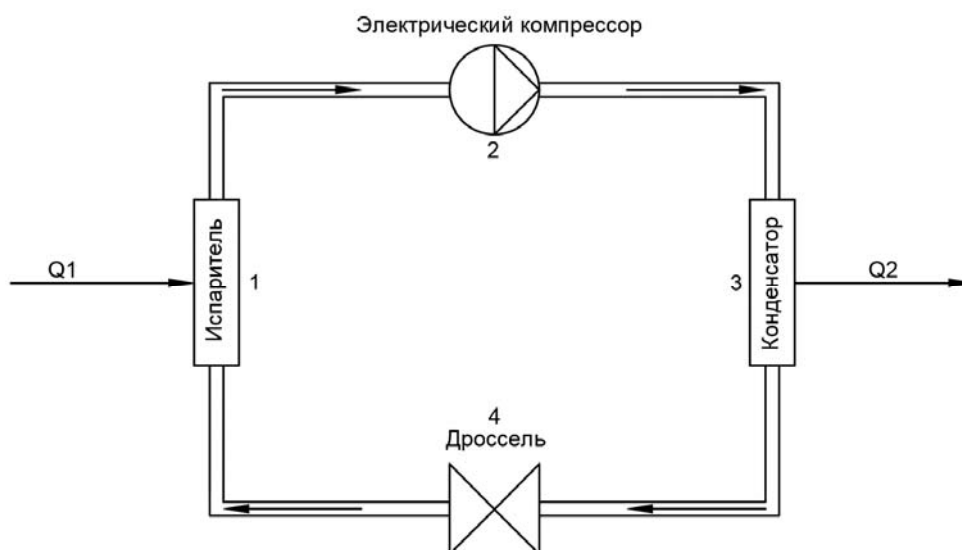


Рисунок 3. Принципиальная схема работы теплового насоса (1 – Испаритель; 2 – Электрический компрессор; 3 – конденсатор; 4 – Дроссель)

Figure 3. Basic operation of a heat pump (1 – Evaporator; 2 – Electric compressor; 3 – Condenser; 4 – Expansion Valve)

Грунт как многофункциональный тепловой аккумулятор

Поверхностные слои земной коры (до глубины 100 метров) представляют собой глобальный тепловой аккумулятор колоссальной емкости. Его тепловой баланс формируется под воздействием двух основных факторов: нисходящего потока солнечной радиации и восходящего потока радиогенного тепла из недр Земли [6; 9; 11–12].

- Солнечное излучение. Суточные колебания температуры проникают на глубину до 1.5 метров, а сезонные – до 15–20 метров. Важной особенностью

является временной сдвиг (лаг): максимальная температура грунта на определенной глубине наблюдается в наиболее холодный период года, и наоборот.

- Геотермальный тепловой поток. Ниже «нейтральной зоны» (15–20 м) температурный режим стабилизируется и определяется внутренним теплом Земли. Температура линейно возрастает с глубиной в соответствии с геотермическим градиентом, составляющим примерно 3°C на каждые 100 метров. Величина теплового потока из недр варьируется от 0.05 до 0.12 Вт/м².

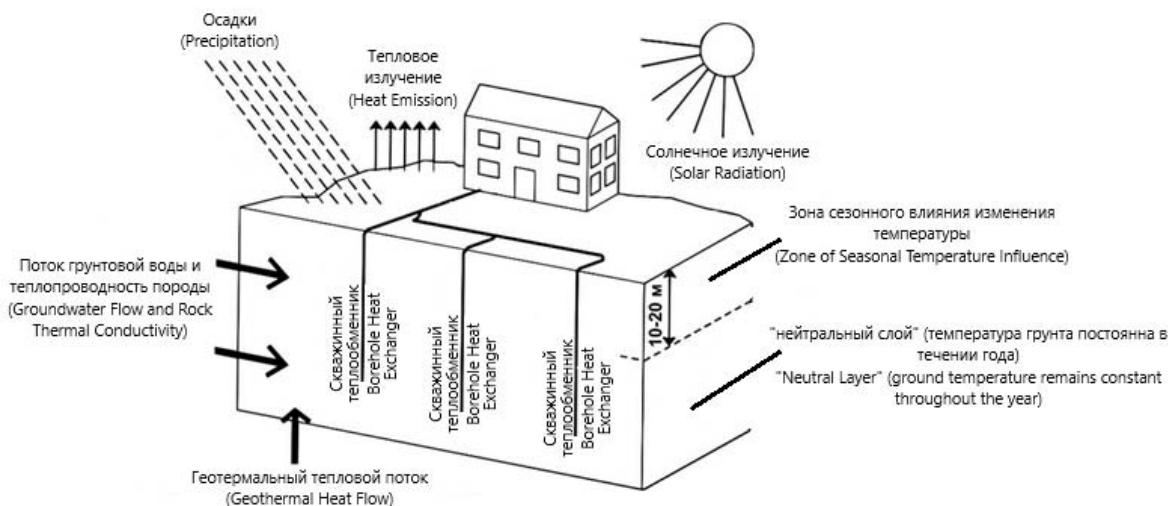


Рисунок 4. Тепловой режим приповерхностных слоев земли
Figure 4. Thermal regime of the near-surface layers of the earth

При устройстве в грунте теплообменника (системы труб с циркулирующим теплоносителем) происходит целенаправленный отбор накопленной тепловой энергии.

Зимой теплоноситель, охлаждаясь в грунте, «забирает» у него тепло и передает его на испаритель теплового насоса. Летом система работает в реверсном режиме, отводя

избыточное тепло из здания в грунт, тем самым охлаждая здание и одновременно «подзаряжая» грунтовый массив теплом к следующему отопительному сезону. Этот процесс повышает общую годовую эффективность системы.

Грунтовый массив, вовлеченный в тепловой обмен, представляет собой сложную трехфазную систему (твердая фаза – минеральный скелет грунта, жидкая – вода, газообразная – воздух и пар). При эксплуатации ГТСТ в холодном климате этот массив подвергается циклическому замораживанию и оттаиванию, что сопровождается фазовыми переходами влаги и изменением его теплофизических свойств (теплопроводности льда, мерзлого и талого грунта, воды сильно различаются). Это предопределяет особые требования к точности прогнозирования работы системы ГТСТ.

Важным аспектом при проектировании систем ГТСТ является долгосрочная стабильность температурного поля грунта. При некорректном расчете может возникнуть накопительный эффект: за отопительный сезон грунт переохлаждается, а за лето не успевает восстановить температурный потенциал. С каждым годом дисбаланс возрастает, что приводит к прогрессирующему падению эффективности системы. По этой причине расчеты должны учитывать не только пиковые нагрузки, но и многолетний тепловой баланс грунтового массива.

Конструктивные особенности систем сбора низкопотенциальной энергии

Системы сбора тепла являются ключевым элементом ГТСТ, определяющим как первоначальные инвестиции, так и долгосрочную эффективность (большой объем земляных работ, высокая стоимость первоначальных вложений, дорогостоящее бурение). В мировой практике сформировалось несколько конструктивных решений, каждое из которых имеет четкую область применения [1; 4; 11–14].

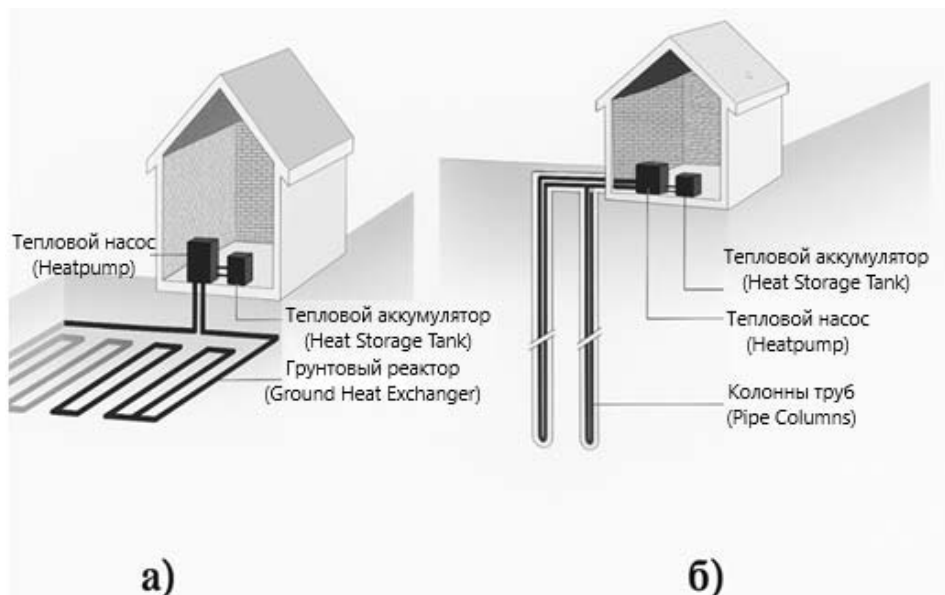


Рисунок 5. Основные типы грунтовых теплообменников: а) горизонтальные б) вертикальные
Figure 5. Main types of ground heat exchangers a) horizontal b) vertical

А) Горизонтальные грунтовые теплообменники

Конфигурация. Трубы укладываются в траншеи ниже глубины промерзания грунта (обычно 1.2 – 2.0 м). Классическая схема – «змейка» из параллельных или последовательно соединенных труб. Для экономии

Открытые системы сбора низкопотенциального тепла Данный тип систем использует в качестве теплоносителя грунтовые воды, извлекаемые из водоносных горизонтов.

Принцип действия. Через эксплуатационную скважину вода подается непосредственно к теплообменнику теплового насоса или к самому насосу, после чего охлажденная (или нагретая) вода возвращается в тот же или соседний пласт через нагнетательную скважину. Часто используется схема с парными скважинами.

Преимущества. Высокая удельная производительность и относительно низкие капиталовложения на единицу полученной тепловой мощности, так как вода является отличным теплоносителем и не требует устройства протяженных трубных регистров.

Ограничения и риски.

Гидрогеологические условия: строительство системы возможно только в районах с достаточной водопроницаемостью грунта и высоким уровнем грунтовых вод.

Качество воды: высокое содержание растворенного железа, солей жесткости или агрессивных соединений может привести к интенсивной коррозии, образованию отложений (скейлинга) и выходу оборудования из строя.

Нормативные барьеры: Во многих странах существуют строгие нормы на изъятие и сброс подземных вод, что может сделать получение разрешения сложным или невозможным.

Замкнутые системы (поверхностные теплообменники)

Эти системы используют замкнутый контур, в котором теплоноситель (чаще всего рассол на основе гликоля) циркулирует по трубам, уложенным в грунте, без прямого контакта с окружающей средой. Они подразделяются на два основных типа.

площади участка разработаны более компактные решения, такие как спиральные теплообменники (горизонтальные или вертикальные).

Преимущества. Относительно низкая стоимость бурения по сравнению с вертикальными скважинами.

Недостатки. Требуемая площадь: для обеспечения достаточной мощности необходима значительная свободная территория (часто в 1.5–2 раза больше отапливаемой площади здания).

Зависимость от климата: эффективность сильно зависит от поступления солнечной радиации на поверхность земли над теплообменником, поэтому участок не должен быть затенен.

Сезонные колебания: температура грунта на этой глубине подвержена сезонным изменениям, что влияет на стабильность коэффициента трансформации.

Б) Вертикальные грунтовые теплообменники (Borehole Heat Exchangers, BHE)

Конфигурация. Трубные регистры размещаются в вертикальных скважинах глубиной от 50 до 200+ метров. Наибольшее распространение получили:

1. U-образные теплообменники: Одна или две пары труб, соединенные внизу. Двойной U-образный контур – наиболее популярный в Европе тип.

2. Коаксиальные (концентрические) теплообменники: Труба меньшего диаметра внутри трубы большего диаметра. Более сложные в монтаже, но часто обладают лучшими теплотехническими характеристиками.

Преимущества. Экономия площади: Не требуют больших земельных участков.

Стабильность: Используют тепловую энергию грунта ниже "нейтральной зоны", где температура постоянна в течение года, что обеспечивает высокий и стабильный COP.

Энергоэффективность: Затраты электроэнергии на циркуляцию теплоносителя обычно ниже, чем в протяженных горизонтальных системах.

Недостатки. Высокая стоимость бурения.

Гибридные и специальные системы

Применение термосвайного типа фундамента. Совмещение функций несущей строительной конструкции (сваи) и грунтового теплообменника. В бетон сваи помещаются пластиковые трубы, что позволяет значительно снизить стоимость устройства фундамента и системы теплосбора одновременно.

Системы "стоящей колонны" (Standing Column Well): Глубокая одиночная скважина, заполненная водой, выполняет роль и теплообменника, и источника/приемника воды. При необходимости возможен сброс части воды для предотвращения замерзания и подпитка из водоносного горизонта. Эффективны только в специфических грунтовых условиях.

Анализ геоэкологических рисков при эксплуатации ГТСТ

Наиболее фундаментальным воздействием ГТСТ на геологическую среду является изменение ее естественного теплового поля. Этот процесс требует тщательного расчёта.

Эксплуатация геотермальных тепловых насосов в режиме отопления сопровождается формированием в грунтовом массиве стационарной или квазистационарной тепловой аномалии — зоны пониженных температур, возникающей вокруг теплообменника. Пространственные характеристики этой аномалии, ее размеры и геометрия, находятся в прямой зависимости от интенсивности и продолжительности теплосъема, термических свойств грунта, а также наличия и скорости фильтрационного потока подземных вод. Согласно результатам исследований, для одиночной скважины глубиной 100 метров радиус теплового влияния может достигать 10–15 метров после десяти лет эксплуатации [6]. В случае

использования групповых скважинных полей, подобных системе колледжа Ричарда Стоктона, наблюдается эффект суперпозиции отдельных тепловых аномалий, что приводит к формированию обширной области охлаждения [10].

Ключевым фактором, оказывающим влияние на динамику данного процесса, являются гидрогеологические условия. Наличие устойчивого потока подземных вод выполняет функцию естественного «теплового конвейера», обеспечивая постоянный приток тепловой энергии к теплообменнику и одновременно отвод охлажденной воды, что существенно ограничивает масштабы и интенсивность теплового воздействия. В условиях слабопроницаемых глинистых грунтов, где теплоперенос осуществляется преимущественно за счет теплопроводности, охлаждающий эффект проявляется более выражено и носит локализованный характер.

В регионах с холодным климатом длительное охлаждающее воздействие может сместить нулевую изотерму на значительную глубину, инициируя промерзание ранее талых грунтов. Фазовый переход поровой воды в лед сопровождается увеличением объема примерно на 9 %, что приводит к началу процесса морозного пучения. Данные силы вызывают деформации фундаментов близлежащих зданий и сооружений, повреждают элементы самих грунтовых теплообменников и нарушают целостность сопутствующих инженерных коммуникаций.

Изменение термического режима оказывает непосредственное влияние на физико-механические свойства грунтового массива. Даже при отсутствии фазовых переходов снижение температуры способно увеличивать прочностные характеристики и несущую способность грунтов, одновременно повышая их хрупкость. В песчаных грунтах температурные колебания могут влиять на величину угла внутреннего трения [8–14].

Важным аспектом воздействия является изменение гидрогеохимических условий. Поскольку температура является одним из ключевых параметров, контролирующих растворимость минералов (таких как карбонат кальция и гипс) и кинетику химических реакций, длительное охлаждение способно смещать химическое равновесие в системе, провоцируя процессы растворения одних минеральных фаз и выпадения в осадок других [1–9].

Наконец, для систем с горизонтальными теплообменниками изменение теплового режима верхних горизонтов грунта напрямую воздействует на почвенные экосистемы. Снижение температуры может замедлять ключевые биохимические процессы, включая разложение органического вещества и нитрификацию, изменять влажностный режим и оказывать негативное влияние на корневые системы растений.

Эксплуатация геотермальных систем с открытым контуром сопряжена с рисками прямого загрязнения гидрогеологической среды. Одним из ключевых факторов является коррозионная активность грунтовых вод, характеризующихся агрессивными свойствами — низким водородным показателем (pH), повышенной минерализацией, включающей хлориды и сульфаты, а также значительными концентрациями железа и марганца. Это приводит к активной коррозии металлических компонентов системы, таких как трубопроводы, теплообменники и насосное оборудование. Образующиеся в результате продукты коррозии, в частности оксиды железа, способны

мигрировать с потоком и выпадать в осадок в прискважинной зоне, вызывая кольматацию порового пространства водоносного горизонта. Данный процесс существенно снижает производительность откачной и нагнетательной скважины.

Нагрев или охлаждение пластовой среды вызывает изменения содержания растворенного кислорода и редокс-потенциала (Eh). Эти сдвиги физико-химических параметров способны перевести ранее стабильные формы загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы (мышьяк, свинец), в подвижное состояние, вызвав их мобилизацию из минеральной матрицы водоносного горизонта.

Что касается замкнутых систем, то основными экологическими рисками, связанными с их эксплуатацией, являются потенциальные последствия утечек теплоносителя. Совершенные растворы на основе пропиленгликоля, позиционируемые как нетоксичные и биоразлагаемые, при масштабном попадании в подземные воды представляют угрозу для окружающей среды. Исторически использовавшийся этиленгликоль является высокотоксичным соединением. Даже условно безопасные теплоносители в условиях анаэробной геологической среды могут подвергаться трансформации, сопровождающейся потреблением растворенного кислорода и нарушением сложившихся биохимических равновесий.

Неправильно спроектированные или некачественно изолированные скважины (как эксплуатационные, так и нагнетательные) могут стать каналами для вертикальной миграции загрязняющих веществ между ранее изолированными водоносными горизонтами. Это представляет особую опасность в промышленных и урбанизированных районах, где верхние водоносные горизонты часто уже загрязнены.

Геомеханические воздействия и риски

Бурение глубоких скважин представляет собой техногенное вмешательство в естественное поле напряжений горных пород. Хотя воздействие одиночной скважины является незначительным, формирование крупномасштабных скважинных полей, насчитывающих сотни стволов, теоретически способно оказывать влияние на региональное напряженно-деформированное состояние геологической среды.

Отдельного рассмотрения требует вопрос сейсмичности. Системы с замкнутым контуром, в которых циркулирует теплоноситель, крайне редко ассоциируются с значительными сейсмическими событиями. В отличие от них, открытые системы, осуществляющие интенсивный забор и нагнетание значительных объемов подземных вод, способны существенно модифицировать поровое давление в продуктивных пластах. Это изменение гидродинамического режима может приводить к снижению эффективных напряжений в зонах тектонических нарушений, выполняя роль триггерного механизма для микроземлетрясений.

Анализ геоэкологических преимуществ эксплуатации ГТСТ

Внедрение геотермальных тепловых насосов (ГТН) снижает выбросы углекислого газа. При прямом замещении происходит полное исключение процессов сжигания ископаемого топлива в локальных котельных установках. Переход системы отопления типового жилого дома в Центральной Европе с природного газа на

геотермальное отопление приводит к снижению эмиссии CO₂ на 50–70 %, что эквивалентно 2.5–4.0 тоннам углекислого газа ежегодно для объекта площадью 200 м².

Преимущество технологии ГТСТ заключается в исключительной энергоэффективности преобразования энергии. При коэффициенте производительности (COP) 3–5 система генерирует 3–5 кВт·ч тепловой энергии на 1 кВт·ч потребленной электрической.

Экологический профиль технологии дополнительно усиливается за счет перехода на хладагенты четвертого поколения. Традиционные фторсодержащие хладагенты (R410A, R134a) замещаются природными хладагентами: углекислый газ (R744), аммиак (R717), углеводороды (R290).

Прямой водосберегающий эффект достигается за счет исключения эксплуатационных потерь воды за счёт использования её в замкнутых контурах. Анализ показывает, что потери воды (по разным причинам, техническим, утечки, испарение) составляют: градирни 50–100 м³/сутки, промышленные системы охлаждения до 500 м³/сутки.

Косвенное ресурсосбережение реализуется за счёт разгрузки тепловых электростанций – крупнейших промышленных потребителей воды. Удельное водопотребление на производство электроэнергии составляет для угольных ТЭС: 1.9–2.3 л/кВт·ч, для газовых ТЭС: 0.7–1.1 л/кВт·ч, для АЭС: 2.5–3.0 л/кВт·ч [11–13].

Благодаря COP=4, геотермальная система снижает косвенное водопотребление на 75–85 % в сравнении с электрическим отоплением и на 60–70 % в сравнении с воздушными тепловыми насосами.

К дополнительным преимуществам систем ГТСТ возможно отнести снижение эмиссии загрязняющих веществ (NO_x, SO_x) в урбанизированных территориях, ликвидацию рисков аварийных разливов топлива, сокращение землеотвода для топливной инфраструктуры, устранение шумового загрязнения.

Снижение локального теплового загрязнения и эффекта "теплового острова"

Крупные городские агломерации характеризуются значительной генерацией антропогенного тепла, формирующего специфический микроклимат с выраженным эффектом «городского теплового острова». Традиционные системы кондиционирования воздуха усугубляют эту проблему, осуществляя прямой сброс тепловой энергии от конденсационных установок в приземный слой атмосферы. Согласно исследованиям, вклад систем охлаждения зданий в тепловую нагрузку урбанизированных территорий может достигать 15–20 % от общего антропогенного тепловыделения в летний период.

Геотермальные тепловые насосные системы предлагают принципиально иной подход к терморегуляции, используя грунтовый массив в качестве распределительного теплового буфера. Этот механизм основан на фундаментальном различии теплофизических характеристик сред: объемная теплоемкость горных пород составляет 800–2500 кДж/м³·K, что в 2–4 раза превышает аналогичный показатель для воздуха, а теплопроводность грунтов варьируется в диапазоне 1.5–3.5 Вт/м·K против 0.025 Вт/м·K у воздушной среды.

Грунтовый массив функционирует как распределенный тепловой аккумулятор, поглощающий избыточное тепло в летний период с последующей рекуперацией в холодный сезон. Низкая тепловая инерция

воздушной среды приводит к быстрому росту температур при тепловом воздействии, тогда как высокая тепловая инерция грунтового массива обеспечивает поглощение значительных тепловых потоков при минимальном изменении температуры. Модельные расчеты демонстрируют, что при тепловой нагрузке 100 кВт сброс в атмосферу приводит к локальному росту температуры на 3–7°C в приземном слое, в то время как аккумуляция в грунтовом массиве вызывает температурный отклик не более 0.5–1.5°C.

Системное внедрение геотермальных технологий позволяет смягчать пиковые тепловые нагрузки через снижение интенсивности городского теплового острова на 1–3°C, улучшать качество воздуха за счет уменьшения энергопотребления традиционных систем кондиционирования, стабилизировать температурный режим приземных слоев атмосферы, а также создавать синергию с другими энергетическими системами через возможность сезонного аккумулирования тепловой энергии. Таким образом, переход на геотермальные системы терморегуляции представляет собой эффективную технологию управления тепловым балансом урбанизированных территорий, обеспечивающую устойчивое развитие городской среды за счет оптимизации энергетических потоков и минимизации антропогенного воздействия на локальный климат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные подходы к проектированию и эксплуатации геотермальных систем предполагают реализацию комплексных мер, направленных на минимизацию потенциальных рисков и обеспечение долгосрочной устойчивости. Ключевым элементом является обязательное применение трехмерного численного моделирования при проектировании крупных скважинных полей. Использование специализированного программного обеспечения, такого как FEFLOW или COMSOL Multiphysics, позволяет осуществлять расчеты с учетом нестационарного теплопереноса, учётом реальной гидрогеологической структуры массива, возможных фазовых переходов воды в лед и пространственной геометрии всей системы скважин. Это обеспечивает точное прогнозирование формирования тепловых аномалий и позволяет оптимизировать конфигурацию системы на этапе проектирования.

Важным компонентом является внедрение систем адаптивного управления, которые обеспечивают динамическое регулирование тепловой мощности на основе данных непрерывного мониторинга температуры грунта в реальном времени. Такие системы позволяют предотвращать критические переохлаждения или перегревы грунтового массива за счет автоматической корректировки режимов работы тепловых насосов в зависимости от текущего теплового состояния массива.

Для объектов мощностью свыше 100 кВт обязательным требованием становится создание разветвленной сети мониторинга, включающей оборудование термометрических скважин, расположенных на различных расстояниях от рабочих скважин и на разных глубинах для контроля развития тепловой аномалии, а также сооружение пьезометрических скважин для отслеживания динамики уровня и химического состава грунтовых вод, что особенно важно для оценки возможного влияния на гидрогеохимический режим.

С точки зрения экологической безопасности, передовой практикой является применение "зеленых" технологий рабочих жидкостей, в частности использование в качестве первичного хладагента природных веществ, таких как диоксид углерода (CO₂) или аммиак (R717), а в качестве вторичного теплоносителя – растворов на основе биоразлагаемых соединений, например, ацетата калия или пропиленгликоля низкой концентрации, что минимизирует потенциальный ущерб в случае утечек. Комплексная реализация указанных мер позволяет обеспечить не только энергетическую эффективность, но и экологическую безопасность геотермальных систем на всех этапах их жизненного цикла.

Широкомасштабное внедрение технологий геотермальных тепловых насосов сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем, которые можно систематизировать по двум основным категориям. Первая группа – научно-методические барьеры – включает дефицит репрезентативных долгосрочных данных о тепловом поведении различных типов грунтов, что критически важно для точного прогнозирования эффективности систем. Существующие математические модели характеризуются ограниченностью, поскольку не в полной мере учитывают гетерогенность трёхфазных сред и воздействие циклических термических нагрузок. Усугубляет ситуацию отсутствие унифицированных методик проектирования, приводящее к значительному разбросу в определяемых параметрах систем.

Вторая группа объединяет экономические и нормативно-правовые барьеры. Значительный объем первоначальных капиталовложений, особенно для систем с вертикальными теплообменниками, остается ключевым сдерживающим фактором. Немаловажную роль играет недостаточная информированность потенциальных заказчиков о долгосрочной экономической эффективности и реальных сроках окупаемости. Кроме того, развитию технологий препятствует неразвитость нормативной базы, выражающаяся в отсутствии комплексной регламентирующей документации и прозрачных административных процедур для получения разрешений, что особенно актуально для систем с открытым контуром.

Использование низкопотенциальной тепловой энергии Земли посредством геотермальных теплонасосных систем представляет собой технологию, доказавшую свою высокую энергетическую и экологическую эффективность в мировом масштабе. Ее ключевыми преимуществами являются универсальность, возобновляемость и способность обеспечивать как отопление, так и охлаждение.

Для успешного развития этого направления в странах с формирующимся рынком, в частности в России, необходима комплексная работа по следующим направлениям:

- Научное обеспечение: Разработка и валидация адекватных математических моделей и национальных стандартов проектирования.
- Государственная поддержка: Создание понятной нормативной базы и стимулирующих мер (субсидии, льготы).
- Информационная политика: Широкая популяризация технологии среди проектировщиков, строителей и конечных пользователей.

Дальнейшая эволюция ГТСТ видится в их интеграции в системы умных энергетических сетей и

совместной работе с другими возобновляемыми источниками энергии, что позволит создавать устойчивые и энергонезависимые объекты недвижимости.

Формирование комплексной системы государственного регулирования представляет собой ключевой фактор ускоренного внедрения геотермальных технологий. Первоочередной задачей является разработка и внедрение национальных стандартов и технических регламентов, устанавливающих обязательные требования на всех этапах жизненного цикла систем. Нормативная база должна включать регламентацию проведения детальных тепловых и гидрогеологических изысканий на участке строительства с определением термического сопротивления грунта, коэффициента теплопроводности пород и гидрогеологических условий. Особое внимание должно уделяться стандартизации требований к качеству тапмонажа скважин, включая состав тапмонажных материалов, их теплопроводность и долговечность, а также к материалам теплообменников, работающих в условиях длительного воздействия агрессивных сред. Для объектов тепловой мощностью свыше 500 кВт необходимо установить обязательный порядок мониторинга с регулярной отчетностью по температурному режиму грунтового массива и динамике химического состава подземных вод.

Экономическое стимулирование должно реализовываться через систему адресных мер, включающих введение "зеленых" тарифов на тепло, производимое геотермальными системами, с применением механизма надбавок к базовому тарифу. Дополнительно целесообразно установление налоговых льгот в форме пониженной ставки налога на имущество для зданий, оборудованных ГТСТ, и ускоренной амортизации оборудования. Расчет размера экономических преференций должен быть привязан к верифицированным показателям сокращения выбросов CO₂, подтвержденным результатами инструментальных замеров и расчетов по утвержденным методикам.

Параллельно необходимо проведение политики ужесточения экологических требований к традиционным системам отопления на основе ископаемого топлива через введение повышенных ставок на тарифы и экологических сборов за выбросы загрязняющих веществ, установление нормативов энергетической эффективности для зданий и поэтапное снижение лимитов допустимых выбросов для котельных установок. Комплексная реализация указанных мер создаст сбалансированную систему экономических стимулов и административных регуляторов, обеспечивающую повышение конкурентоспособности низкоуглеродных технологий и формирование условий для масштабного перехода к устойчивой энергетической инфраструктуре.

Объект исследования «геотермальные теплонасосные системы» представляет собой междисциплинарную технологию, интегрирующую достижения энергетики, экологии и наук о Земле. Потенциал данной технологии для декарбонизации энергетического сектора и улучшения параметров городской среды является значительным, однако её не следует рассматривать в качестве универсального решения, лишённого экологических издержек.

Комплексный подход при проектировании систем ГТСТ должен включать проведение тщательных предпроектных изысканий, направленных на изучение геологического строения и гидрогеологических условий площадки, применение современных математических

моделей, позволяющих прогнозировать долгосрочное тепловое и гидрогеохимическое воздействие на геологическую среду, использование материалов с подтверждёнными эксплуатационными характеристиками при строгом соблюдении технологических нормативов монтажа, а также внедрение систем непрерывного мониторинга и адаптивного управления эксплуатационными режимами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // Георесурсы. 2020. Т. 22. N 4. С. 113–122. DOI: 10.18599/grs.2020.4.113-122
2. Lund J.W., Boyd T.L., Freeston D.H. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review // *Geothermics*. 2021. V. 90. Article id: 101971. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101971>
3. Psomas A., Bariamis G., Rouillard J., Stein U., Roy S., Study of the impacts of pressures on groundwater in Europe: Analysis of groundwater associated aquatic ecosystems (GWAAEs) and groundwater dependent terrestrial ecosystems (GWDTEs), 2021.
4. Бутузов В.А. Обзор российских геотермальных теплонасосных технологий // Энергетик. 2022. N 2. С. 40–44. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.80.96.009>
5. Дадацкий А.В., Космовский П.Ю. Тепловой насос. Принцип работы теплового насоса // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 23–24 мая 2019 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2019. С. 172–174.
6. Cantor A., Owen D., Harter D., Nylen G., Kiparsky M. Navigating groundwater-surface water interactions under the Sustainable Groundwater Management Act, Center for Law, Energy & the Environment, UC Berkley School of Law, Berkley, CA. 2018.
7. Волошин В.Р., Белов К.В. Модельные исследования эффективности использования грунтовых вод как низкопотенциальных источников энергии // *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*. 2024. V. 66(3). P. 88–99. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-3-88-99>
8. Liu G. Study on Heat Transfer Model of Capillary Exchanger in Subway Source Heat Pump System // *Renewable Energy*. 2020. V. 150. P. 1074–1088. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.112
9. Ильина Т.Н. Возобновляемые и вторичные источники энергии инженерных систем при эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений // *Вестник евразийской науки*. 2023. Т. 15. N 4. Article id: 39SAVN423.
10. Han J., Cui M., Chen J., Lv W. Analysis of Thermal Performance and Economy of Ground Source Heat Pump System: a Case Study of the Large Building // *Geothermics*. 2021. V. 89. Article id: 101929. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101929
11. Васильев Г.П. Применение ГТСТ в России // *Энергия: экономика, техника, экология*. 2009. N 7. С. 22–29.
12. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. Москва: Издательский дом "Граница", 2006. 173 с.
13. Васильев Г.П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоев Земли для теплохладоснабжения здания // *Теплоэнергетика*. 1994. N 2. С. 31–35.
14. ГОСТ 34346.2-2017 Тепловые насосы с водой в качестве источника тепла. Испытания и оценка рабочих характеристик. Часть 2. М.: Стандартинформ, 2018.
15. Дадацкий А.В., Космовский П.Ю. Тепловой насос. Принцип работы теплового насоса // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: Сборник научных статей, Гродно, 23–24 мая 2019 года / Редколлегия: А.Р. Волик и др.. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2019. С. 172–174.
16. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88. М.: Минрегион России, 2012.

17. Ржесик К.А., Осокин В.В., Карнаух В.В. Хладотеплотехника: инновации и достижения : Монография, посвященная 55-летию со дня основания кафедры холодильной и торговой техники имени В.В. Осокина. Донецк: ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», 2024. 536 с.
18. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy: 2020 worldwide review // Proc. World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, 2020, 39 p.

REFERENCES

1. Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Modern trends in the development of geothermal resources. *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 113–122. (In Russian) <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>
2. Lund J.W., Boyd T.L., Freeston D.H. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 2021, vol. 90, article id: 101971. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101971>
3. Psomas A., Bariamis G., Rouillard J., Stein U., Roy S. Study of the impacts of pressures on groundwater in Europe: Analysis of GWAAEs and GWDTEs. 2021.
4. Butuzov V.A. Review of Russian geothermal heat pump technologies. *Energetik*, 2022, no. 2, pp. 40–44. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.80.96.009>
5. Dadatsky A.V., Kosmovsky P.Yu. [Heat pump: principle of operation]. In: *Traditsii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva: Sbornik nauchnykh statey, Grodno, 23–24 maya 2019 goda*. [Traditions, Modern Problems and Prospects for Construction Development of Construction: Collection of Scientific Articles, Grodno, May 23–24, 2019]. Grodno, Yanka Kupala Grodno State University Publ., 2019, pp. 172–174. (In Russian)
6. Cantor A., Owen D., Harter D., Nylen G., Kiparsky M. Navigating groundwater-surface water interactions under the Sustainable Groundwater Management Act. UC Berkeley School of Law, 2018.
7. Voloshin V.R., Belov K.V. Model studies of the efficiency of groundwater use as a low-potential energy source. *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*, 2024, vol. 66, no. 3, pp. 88–99. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-3-88-99>
8. Liu G. et al. Study on heat transfer model of capillary exchanger in subway source heat pump system. *Renewable Energy*, 2020, vol. 150, pp. 1074–1088. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.112
9. Ilyina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I. Renewable and secondary energy sources of engineering systems during the operation and reconstruction of buildings and structures. *Vestnik Evraziiskoi nauki* [Eurasian Science Bulletin]. 2023, vol. 13, no. 4, article id: 39SAVN423. (In Russian)
10. Han J., Cui M., Chen J., Lv W. Analysis of thermal performance and economy of ground source heat pump system: A case study of a large building. *Geothermics*, 2021, vol. 89, p. 101929. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101929
11. Vasiliev G.P. Application of GHPS in Russia. *Ehnergiya: ehkonomika, tekhnika, ehkologiya* [Energy: Economics, Technology, Ecology]. 2009, no. 7, pp. 22–29. (In Russian)
12. Vasiliev G.P. *Teplokhodosnabzhenie zdaniy i sooruzhenii s ispol'zovaniem nizkopotentsial'noi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli* [Heating and cooling of buildings using low-grade thermal energy of surface soil layers]. Moscow, Granitsa Publ., 2006, 173 p. (In Russian)
13. Vasiliev G.P. The use of low-potential thermal energy of soil surface layers for building heating and cooling. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 1994, no. 2, pp. 31–35. (In Russian)
14. *GOST 34346.2-2017 Teplovye nasosy s vodoi v kachestve istochnika tepla. Ispytaniya i otsenka rabochikh kharakteristik. Chast' 2* [GOST 34346.2–2017. Water-source heat pumps. Testing and rating for performance. Part 2]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. (In Russian)
15. Dadatsky A.V., Kosmovsky P.Yu. Heat pump: principle of operation. In: *Traditsii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva* [Traditions, Modern Problems and Prospects for Construction Development]. 2019, no. 1, pp. 172–174. (In Russian)
16. *SP 25.13330.2012 Osnovaniya i fundamente na vechnomerzlykh gruntakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 2.02.04–88* [SP 25.13330.2012. Bases and foundations on permafrost soils. Updated version of SNIP 2.02.04–88]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2012. (In Russian)
17. Rzheshik K.A., Osokin V.V., Karnaukh V.V. et al. *Khладотеплотехника: innovatsii i dostizheniia* [Refrigeration and Thermal Engineering: Innovations and Achievements]. Donetsk, DonNUET Publ., 2024, 536 p. (In Russian)
18. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy: 2020 worldwide review. Proc. World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland, 2020, 39 p.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Валерий Р. Волошин и Константин В. Белов внесли вклад в разработку концепции статьи, методики статьи и результатов исследования, подготовили текст статьи, окончательно утвердили публикуемую версию статьи. Мин Оак Со и Людмила В. Боронина участвовали в подготовке текста статьи, окончательно утвердили публикуемую версию статьи. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Valeriy R. Voloshin and Konstantin V. Belov developed contribution to the article concept, contributed to the development of the article's methodology and research results, prepared the article text, gave final approval to the published version of the article. Min Oak So and Lyudmila V. Boronina participated in the preparation of the article text, gave final approval to the published version of the article. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Валерий Р. Волошин / Valeriy R. Voloshin <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>

Константин В. Белов / Konstantin V. Belov <https://orcid.org/0009-0009-5105-4627>

Мин Оак Со / Min Oak So <https://orcid.org/0009-0000-6252-9880>

Людмила В. Боронина / Lyudmila V. Boronina <https://orcid.org/0000-0002-2442-9050>