

ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ И ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ МИНСКОЙ ОБЛАСТИ

В. И. ЗУЙ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. В десятках буровых скважин на территории Минской области выполнена регистрация многочисленных термограмм высокоточными скважинными термометрами. На основе накопленных данных построены карты распределения температуры в пределах региона и сделаны первые оценки плотности ресурсов низко-энтальпийной геотермальной энергии. В качестве примера приведены карты распределения температуры на глубинах 100 и 200 м и карта плотности извлекаемых ресурсов подземного тепла, заключенного в интервале глубин 100–200 м. Выявлена значительная неоднородность как поля распределения температуры, так и геотермальных ресурсов в границах Минской области. Рассмотрены параметры геотермического поля региона, и показаны перспективы использования подземного тепла для практических нужд, в частности для отопления зданий, теплиц и иных сооружений, осуществления сушки в различных технологических процессах и др. Описаны основные технологические схемы отбора природного тепла из подземных горизонтов, приемлемые для освоения геотермальных ресурсов в Минской области. Отмечено, что к настоящему времени в регионе созданы и введены в эксплуатацию десятки небольших геотермальных установок на базе промышленных тепловых насосов.

Ключевые слова: геотермическое поле; распределение температуры; геотермическая карта; геотермальная установка; Минская область; Беларусь.

THERMAL FIELD AND GEOTHERMAL RESOURCES OF THE MINSK REGION

V. I. ZUI^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Abstract. Numerous thermograms were recorded using high-precision borehole thermometers in dozens of boreholes in the Minsk Region. The accumulated data allowed us to construct temperature distribution maps within the region and make initial estimates of the distribution density of low-enthalpy geothermal energy resources. As an example, maps of temperature distribution at depths of 100 and 200 m and a map of the density of recoverable underground heat resources available within the 100–200 m depth interval are presented. Significant heterogeneity in both the temperature distribution and geothermal resources within the region was revealed. This paper examines the parameters of the region's geothermal field and demonstrates the potential for using the underground heat for practical purposes, specifically for heating buildings, greenhouses, drying processes, and more. It also describes the main technological schemes for extracting natural heat from underground horizons, suitable for developing geothermal resources in the Minsk Region. Dozens of small geothermal installations based on industrial heat pumps have already been created and are operating in the region.

Keywords: geothermal field; temperature distribution; geothermal map; geothermal installation; Minsk Region; Belarus.

Образец цитирования:

Зуй В.И. Тепловое поле и геотермальные ресурсы Минской области. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;2:106–118.
EDN: GUEFNJ

For citation:

Zui V.I. Thermal field and geothermal resources of the Minsk Region. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;2:106–118. Russian.
EDN: GUEFNJ

Автор:

Владимир Игнатьевич Зуй – доктор геолого-минералогических наук, профессор; профессор кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

Author:

Vladimir I. Zui, doctor of science (geology and mineralogy), full professor; professor at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.
zui@bsu.by

Введение

Геотермические исследования в Беларуси начаты в конце 1950-х гг. Первая термограмма, зарегистрированная в глубокой скважине Припятского прогиба, была опубликована еще в 1954 г. М. Ф. Беляковым [1] в связи с инициированными в послевоенные годы работами по изучению глубинного строения, поиску и разведке нефтяных залежей глубокого осадочного бассейна в юго-восточной части страны. Начиная с 1969–1970 гг. заметный вклад в развитие геотермических исследований в республике внесли Г. В. Богомолов, Л. А. Цыбуля, П. П. Атрошенко, М. Д. Пархомов, А. П. Пинчук, В. Г. Левашкевич, В. И. Зуй и др.¹ В последующие годы осуществлялось постепенное накопление геотермических данных: по всей стране, включая Минскую область, велась регистрация термограмм в скважинах, находящихся в тепловом равновесии после завершения буровых работ, на основе лабораторных методов определялись тепловые свойства образцов бурового керна разного литологического состава, изучалась плотность теплового потока. Как результат, к настоящему времени в Беларуси накоплены сотни термограмм, зарегистрированных в буровых скважинах различных регионов, в том числе Минской области.

Хотя к концу XX в. и был достигнут существенный прогресс в изучении геотермического поля, но в целом рассматриваемая территория оставалась недостаточно изученной. Дальнейшее расширение геотермических исследований произошло после 2000 г. В середине 1990-х гг. в Минской области была создана и введена в эксплуатацию первая геотермальная установка на базе теплового насоса, запроектированная И. С. Жидовичем и предназначенная для обогрева надскважинного павильона на одном из водозаборов возле Минска. Это событие положило начало использованию подземного тепла для практических нужд.

Геотермическое поле характеризует, с одной стороны, тепловой режим земных недр, распределение геотермических параметров в горных породах по глубине и площади, а с другой стороны, ресурсы подземного тепла, для их оценки используют ряд методик [2; 3]. Тепло, содержащееся в горных породах, представляет собой источник геотермальной энергии, практическое освоение которого на протяжении нескольких десятилетий успешно ведется в ряде стран. С этих позиций геотермальная энергия земных недр имеет явно выраженный прикладной аспект.

Методика исследования и получения исходных данных

Геотермический режим недр традиционно отображается на картах распределения температуры на выбранных глубинах или стратиграфических поверхностях, а также на картах плотности теплового потока либо извлекаемых ресурсов подземного тепла. Сведения о распределении температуры по глубине скважин – термограммы – являются важными исходными данными.

Регистрацию термограмм в скважинах рассматриваемого региона выполняли с помощью двух типов высокочувствительных скважинных приборов – аналогового терморезисторного и цифрового электротермометров. В качестве термочувствительного элемента (датчика) в первом из них используются кобальт-марганцевые терморезисторы типа КМТ, электрическое сопротивление которых быстро снижается под влиянием температуры окружающей среды. Крутизна их характеристики позволяет регистрировать температуру с погрешностью около 0,01 °С. Однако с учетом инструментальной погрешности всего скважинного термометра, погрешностей в системе датчик в скважине – кабель – регистратор на земной поверхности, а также необходимости соблюдения ряда требований (например, приложенное к терморезистору напряжение не должно превышать 1 В, чтобы избежать его подогрева измерительным током) точность измерений составляет приблизительно 0,03 °С. Информация на регистрирующий прибор (электрический мост или электронный омметр) поступает в аналоговом виде.

Второй тип приборов – цифровой скважинный электротермометр – обеспечивает аналогичные чувствительность и точность измерения температуры. Термочувствительным элементом в нем является платиновая проволока, электрическое сопротивление которой линейно возрастает с увеличением температуры. Аналоговый сигнал с датчика обрабатывается аналого-цифровым преобразователем и через электрический кабель поступает на земную поверхность в цифровом виде для отображения на электронном регистраторе (рис. 1). Оба типа скважинных термометров были откалиброваны по выпускаемым промышленностью эталонным ртутным термометрам ТР-1 с ценой деления 0,01 °С.

Примеры общего вида цифрового скважинного электротермометра и процесса регистрации термограммы в полевых условиях, выполненной в осенний период на площади залегания калийных солей в скважине 96бг на территории Солигорского района Минской области, приведены на рис. 2.

Примеры термограммы и геотермического градиента (скорости нарастания температуры с увеличением глубины) скважины 96бг приведены на рис. 3. В данном случае имеет место монотонное нарастание температуры с увеличением глубины спуска геотермического зонда (см. рис. 3, а). Вариация геотермического градиента (см. рис. 3, б) связана с изменяющимся напластованием горных

¹Зуй В. И. Основы геотермии : пособие. Минск : БГУ, 2017. 287 с.

пород, составляющих литологический разрез, во вскрытой толще осадочного чехла. В зависимости от чередования пластов разного литологического состава изменяется их теплопроводность.

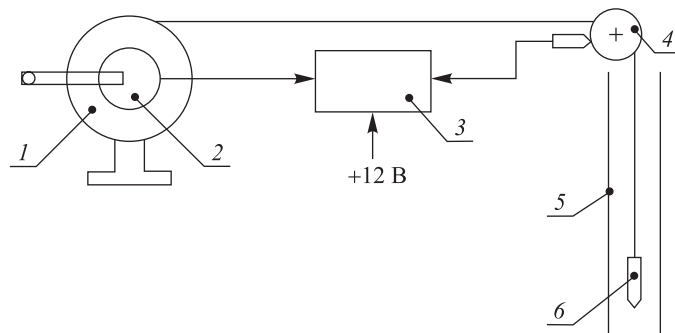


Рис. 1. Схема регистрации температуры с помощью цифрового скважинного электротермометра:
1 – ручная или машинная лебедка; 2 – щеточный узел (коллектор); 3 – устройство отображения информации;
4 – блок-баланс с датчиком глубины; 5 – стенка скважины; 6 – скважинный зонд

Fig. 1. Temperature recording diagram using a digital borehole thermometer:
1 – manual or machine winch; 2 – brush unit (collector); 3 – information display device;
4 – balance block with depth sensor; 5 – borehole wall; 6 – borehole probe



Рис. 2. Общий вид цифрового скважинного электротермометра (а) и процесс регистрации термограммы в скважине 966г, пробуренной в Солигорском районе Минской области (северо-западная часть Припятского прогиба) (б)

Fig. 2. General view of a digital borehole thermometer (a) and the process of recording a thermogram in the borehole 966g drilled in the Soligorsk District of the Minsk Region (northwestern part of the Pripyat Trough) (b)

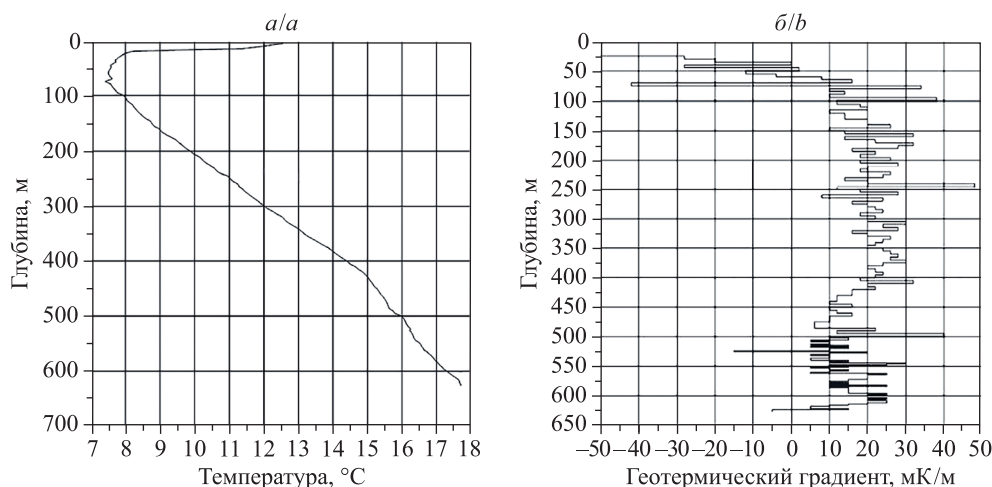


Рис. 3. Термограмма (а) и геотермический градиент (б) скважины 966г, пробуренной в Солигорском районе Минской области (северо-западная часть Припятского прогиба)

Fig. 3. Thermogram (a) and geothermal gradient (b) for the borehole 966g drilled in the Soligorsk District of the Minsk Region (northwestern part of the Pripyat Trough)

Распределение температуры на глубинах 100 и 200 м

Изменчивость распределения температуры по площади на различных глубинах традиционно отражают на картах. Чтобы дать об этом представление, мы составили карты распределения температуры в Минской области для двух глубин – 100 и 200 м. Они построены по результатам регистрации термограмм. В регионе изучена неравномерная сеть скважин (их положение обозначено желтыми кружками). На картах изображен характер температурного поля Минской области и непосредственно прилегающих к ее границе участков соседних областей. Карта распределения температуры в регионе на глубине 100 м приведена на рис. 4.

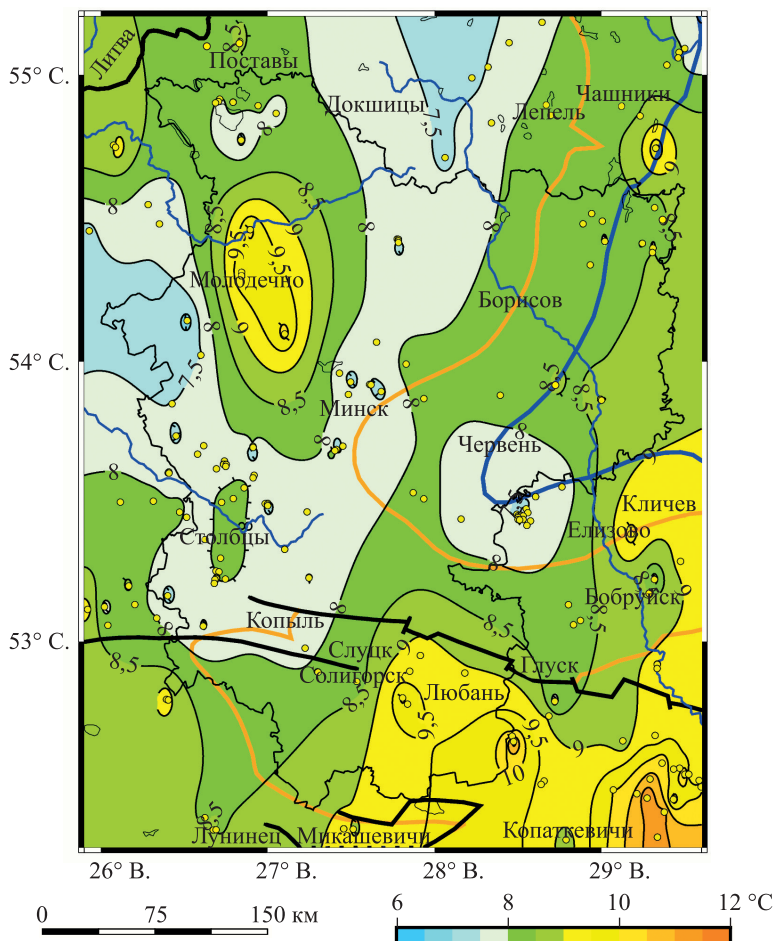


Рис. 4. Карта распределения температуры в Минской области на глубине 100 м.

Линиями черного цвета показаны основные разломы и граница области, линиями оранжевого и синего цвета – границы Белорусской антеклизы и Оршанской впадины соответственно. Желтыми кружками обозначено положение скважин с зарегистрированными термограммами

Fig. 4. Temperature distribution map in the Minsk Region at the depth of 100 m.

Black lines show the main faults and the region's border, orange and blue lines show borders of the Belarusian Anticline and the Orsha Depression, respectively. Yellow circles indicate the location of wells with recorded thermograms

Как видно из рис. 4, в пределах Минской области наблюдается заметная дифференциация температурного поля. В окрестностях Минска, Червеня и Копыля выделяются аномалии низких значений температуры (менее 7 °C). Положительные значения температуры (до 9–10 °C) отмечены на юге Минской области (в геологическом отношении это северо-западная часть Припятского прогиба), а также севернее Минска в пределах Молодечненско-Вилейской геотермической аномалии меридионального простирания, которая была выделена по трем изученным скважинам. Повышенные значения температуры (более 9–10 °C) выявлены в юго-восточной части рассматриваемого региона. Ее рост продолжается и за пределами Минской области в восточном и южном направлениях.

Карта распределения температуры в регионе на глубине 200 м приведена на рис. 5, из которого следует, что здесь в основном сохраняются аномалии, выявленные на глубине 100 м (см. рис. 4), при этом возрастают значения температуры (максимум достигает уже 12 °C) и увеличивается диапазон ее изменения, а также контрастность геотемпературного поля.

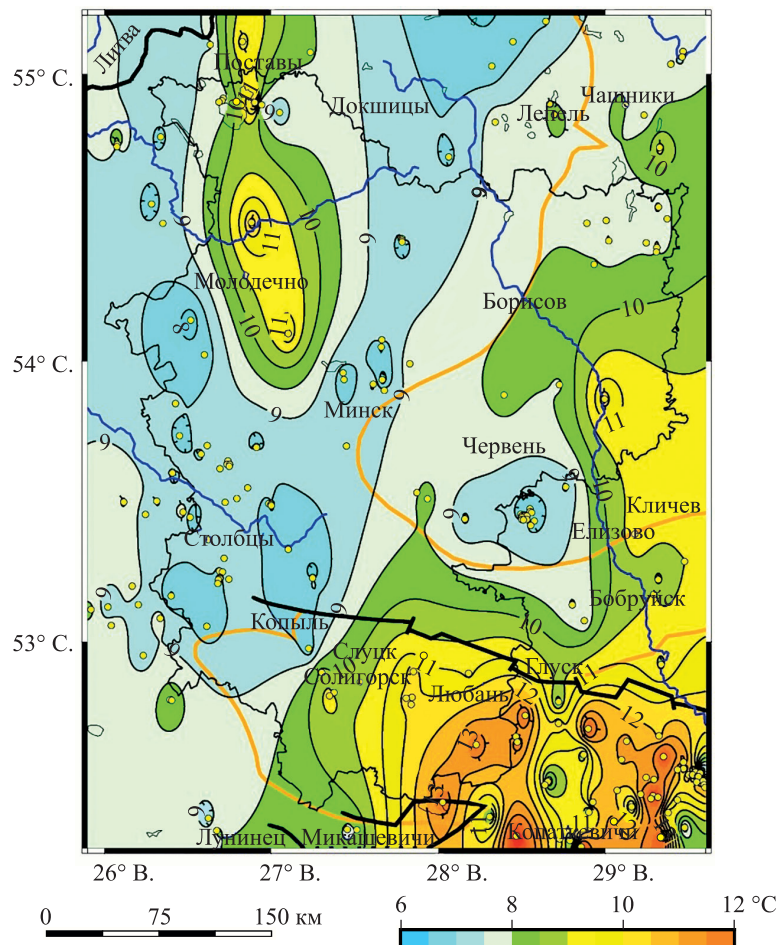


Рис. 5. Карта распределения температуры в Минской области на глубине 200 м.

Линиями черного цвета показаны основные разломы и граница области, линиями оранжевого цвета показана граница Белорусской антеклизы.

Желтыми кружками обозначено положение скважин с зарегистрированными термограммами

Fig. 5. Temperature distribution map in the Minsk Region at the depth of 200 m.

Black lines show the main faults and the region's border, orange line shows the border of the Belarusian Anticline.

Yellow circles indicate the location of wells with recorded thermograms

Ресурсы геотермальной энергии

На практике используются две основные методики оценки геотермальных ресурсов – методика, разработанная Санкт-Петербургским горным университетом императрицы Екатерины II, и методика, принятая в странах Западной Европы. В рамках первой методики выделяют следующие категории ресурсов геотермальной энергии [3]: перспективные (С3) и прогнозные (Р1 и Р2). Ресурсы категории Р2 представляют собой запасы тепла, накопленные в горных породах, без учета реальной возможности его извлечения. Они определяются для больших регионов. Ресурсы категории Р1 рассчитываются исходя из директивных требований теплопотребителя к температуре поступающего и возвращаемого теплоносителя с учетом коэффициента его температурного извлечения до глубин, промышленно и массово освоенных бурением (6 км), и возможного догрева. Однако в пределах геологических структур Минской области на глубине 6 км, как правило, залегают породы кристаллического фундамента, которые характеризуются отсутствием пористости и локальной трещиноватостью лишь на отдельных участках, что затрудняет циркуляцию флюидов. Кроме того, мощность платформенного чехла в Минской области чаще всего составляет менее 500 м и только в самой южной части региона может превышать 1000 м.

Вторая методика, принятая в странах Западной Европы, использует модель объемного содержания тепла в пористых коллекторах и предполагает извлечение геотермальной энергии системой дублетов скважин (по эксплуатационной скважине пластовая вода поднимается на земную поверхность, а по нагнетательной скважине отработанная вода, с которой «снята» часть температуры, возвращается обратно в пласт).

С учетом вышеизложенного для оценки плотности геотермальных ресурсов в рамках настоящей работы была выбрана вторая методика². Оценка плотности ресурсов подземного тепла с ее использованием требует наличия данных о распределении температуры в изучаемом интервале глубин и тепловых свойствах слагающих его горных пород (объемная теплоемкость горных пород и объемная теплоемкость воды), а также знания особенностей применяемой технологии отбора геотермальной энергии (прямое использование подземного тепла, применение теплонасосных установок и т. п.).

В целом с увеличением глубины геологического разреза температура возрастает, увеличивается и плотность ресурсов геотермальной энергии. Так, например, в пределах Припятского прогиба максимальная зарегистрированная температура на вертикальной глубине 6,4 км в скважине «Предречицкая-1» превышает 139 °С.

Для эффективного освоения подземного тепла лучше выбирать более глубокие геотермальные горизонты. Однако в них увеличивается минерализация термальных рассолов, что осложняет процесс извлечения тепла. В глубоких горизонтах платформенного чехла минерализация термальных рассолов может превышать 400 г/дм³ [4]. Такие высококонцентрированные рассолы оказывают агрессивное воздействие на металл эксплуатационных колонн скважин. Более того, при их откачке происходит выпадение кристаллов солей из пересыщенного раствора и их постепенное осаждение на стенках колонн, что может привести к закупорке последних. С технологической точки зрения наиболее благоприятные условия для использования геотермальной энергии существуют в горизонтах платформенного чехла, содержащих пресные воды (рис. 6).

В границах Минской области на территории Белорусской антеклизы преобладающая мощность платформенного чехла изменяется в диапазоне от приблизительно 100 до 500 м [5]. Водоносные горизонты здесь содержат пресные или слабоминерализованные воды, что является благоприятным фактором для использования их тепла.

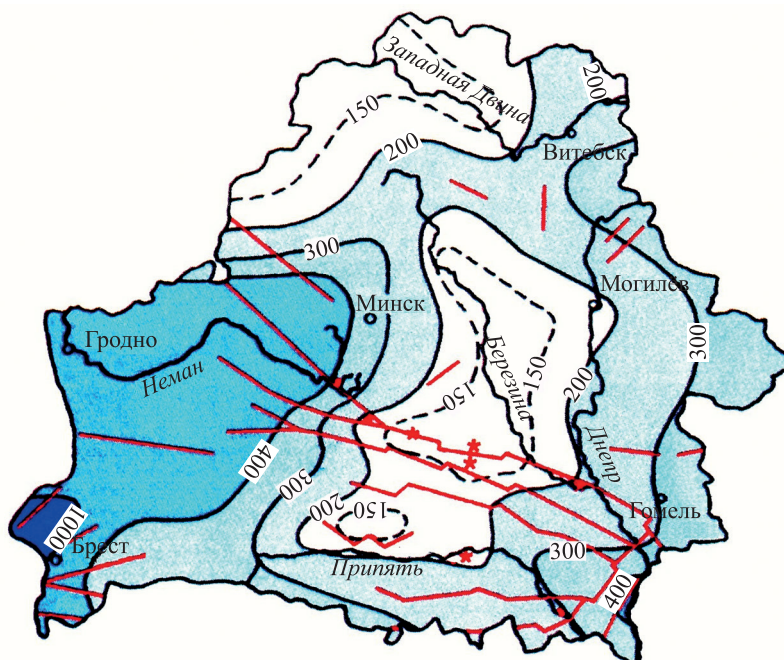


Рис. 6. Схема глубины залегания подошвы пресных вод в Беларуси.
Звездочками отмечены отдельные аномалии разгрузки глубинных минерализованных вод над разломами.
Источник: [5], с изменениями

Fig. 6. Scheme of the depth of occurrence of the bottom of fresh water in Belarus.
Individual anomalies of discharge of deep mineralised waters above faults are marked with asterisks.
Source: [5], modified

Возврат отработанных термальных вод в водоносные горизонты предотвращает падение давления в них во время эксплуатации, а также исключает загрязнение поверхностных водотоков отработанными флюидами.

²Atlas of geothermal resources in Europe / Europ. Commiss. ; ed.: S. Hurter, R. Haenel. Luxembourg : Office for Offic. Publ. of the Europ. Communities, 2002. 92 p., 89 pl. of maps (Publication of the European Commission ; No. EUR 17811).

Плотность ресурса H_1 (в джоулях) оценивается по формуле³

$$H_1 = H_0 R_0,$$

где H_0 – тепло, содержащееся в породах на месте их залегания и подразумевающее объемную модель его извлечения; R_0 – коэффициент извлечения, представляющий собой часть тепла, которая подлежит добыче. Параметр H_0 включает тепло, запасенное в матрице горной породы и воде, заполняющей поровое пространство⁴:

$$H_0 = [(1-P)\rho_m c_m + P\rho_w c_w][T_t - T_0] A \Delta z,$$

где ρ_m, ρ_w – плотность матрицы горной породы и плотность воды соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_m, c_w – удельная теплоемкость матрицы горной породы и удельная теплоемкость воды соответственно, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; P – эффективная пористость; T_t – температура на кровле водоносного горизонта, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – температура на земной поверхности, $^{\circ}\text{C}$; A – рассматриваемая площадь земной поверхности, м^2 ; Δz – эффективная мощность водоносного горизонта, м.

В расчетные соотношения входят объемная теплоемкость горной породы и объемная теплоемкость воды ($\rho_m c_m$ и $\rho_w c_w$ соответственно). Значения первого параметра определяются в ходе лабораторных измерений, выполняемых на образцах керна, который был поднят при бурении скважин. При определении значений второго параметра следует учитывать, что удельная теплоемкость воды зависит от температуры. Вид этой зависимости представлен на рис. 7, из которого следует, что минимальные значения удельной теплоемкости воды приходятся на диапазон температур от 30 до 50 $^{\circ}\text{C}$.

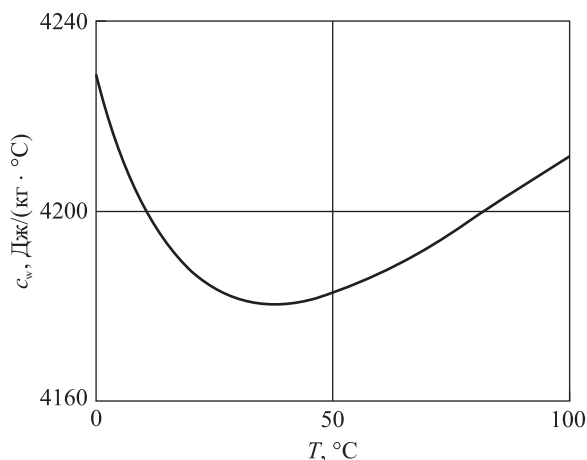


Рис. 7. Удельная теплоемкость воды в зависимости от температуры.
Источник: Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике.
7-е изд., стер. М.: Наука, 1976. 256 с.

Fig. 7. Specific heat capacity of water depending on temperature
Source: Koshkin N. I., Shirkevich M. G. Handbook of elementary physics.
7th ed., ster. Moscow: Nauka, 1976. 256 p.

Коэффициент R_0 зависит от выбранной технологии извлечения подземного тепла. Если добыча геотермальной энергии производится с использованием дублета скважин (наиболее эффективный способ, при котором через эксплуатационную скважину осуществляется подъем геотермального флюида, а через нагнетательную скважину – захоронение отработанного флюида в водоносный горизонт), то

$$R_0 = \frac{0,33(T_t - T_r)}{(T_t - T_0)},$$

где T_r – температура закачки (реинжекции), $^{\circ}\text{C}$.

Данные, необходимые для оценки плотности ресурсов геотермальной энергии с использованием описанной методики, можно получить из литолого-стратиграфического описания вскрытого бурением разреза, информации о пористости образцов горных пород, каротажных диаграмм, сведений о тепловых свойствах горных пород [6; 7] и термограмм скважин. Знание других критичных параметров не требуется.

³Atlas of geothermal resources in Europe... 92 p., 89 pl. of maps.

⁴Ibid.

В выбранном интервале глубин на территории Минской области существует ряд водоносных горизонтов, содержащих пресные воды и разделенных слабопроницаемыми отложениями с многочисленными гидрогеологическими окнами (рис. 8). С этой точки зрения в первом приближении интервал глубин 100–200 м можно рассматривать как единый геотермальный горизонт.

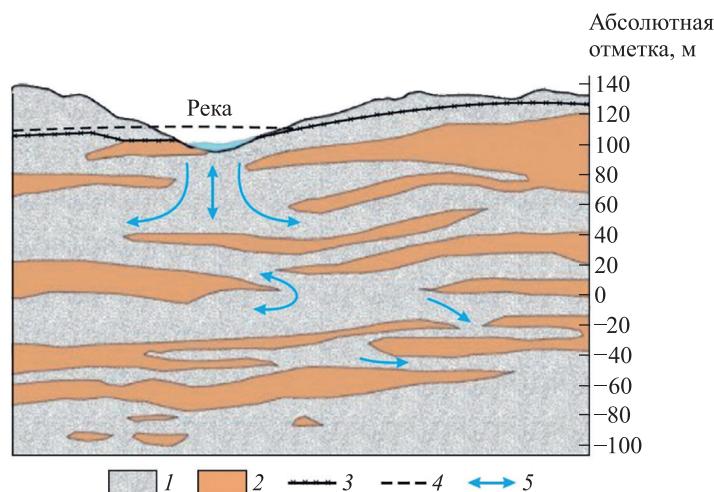


Рис. 8. Пример, поясняющий строение верхней части геологического разреза в зоне распространения пресных вод с гидрогеологическими окнами, соединяющими водоносные горизонты: 1 – водоносные отложения; 2 – относительные водоупоры; 3 – нормальное положение зеркала грунтовых вод; 4 – положение зеркала грунтовых вод в периоды половодья; 5 – направления фильтрации воды.

Источник: [8]

Fig. 8. An example explaining the structure of the upper part of a geological section in a freshwater distribution zone with hydrogeological windows connecting aquifers: 1 – water-bearing deposits; 2 – relative aquicludes; 3 – normal position of the groundwater table; 4 – position of the groundwater table during flood periods; 5 – directions of water filtration.

Source: [8]

Данные, необходимые для использования принятой методики расчетов, не предполагают проведения специальных тестов скважин. Как отмечено выше, они могут быть получены из литолого-стратиграфического описания вскрытого бурением разреза, информации о пористости образцов горных пород, каротажных диаграмм и термограмм скважин. В гидрогеологической практике не всегда имеется информация о пористости, проницаемости или гидропроводности продуктивных толщ. Расчет этих параметров требует проведения откачек из скважин либо специальных расчетов по диаграммам производственного каротажа скважин. Кроме того, полученные таким образом величины проницаемости характеризуют локальные участки и являются весьма изменчивыми по площади даже в пределах одной геологической структуры.

При выполнении расчетов плотности геотермальных ресурсов использованы следующие данные: температура на кровле водоносного горизонта (глубина 100 м), взятая из термограмм скважин, а также объемная теплоемкость горных пород и объемная теплоемкость воды, принятые равными $2,76 \cdot 10^6$ и $4,18 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · °С) соответственно. Пористость водоносных пород изменяется в широких пределах (вплоть до 30–35 %) в зависимости от их литологического и гранулометрического состава, а также степени цементации. С учетом того что реальный разрез включает и водонепроницаемые породы, в качестве усредненной пористости пород по всему разрезу автор принял несколько заниженную величину (5 %), чтобы не переоценить расчетные значения плотности геотермальных ресурсов. При проектировании конкретных геотермальных установок эта величина подлежит уточнению.

Полученные расчетные значения плотности геотермальных ресурсов пересчитаны в килограммах условного топлива на квадратный метр (далее – кг у. т./м²). Переводной коэффициент, обеспечивающий связь между единицами измерения, выраженными в джоулях, с одной стороны, и единицами измерения, выраженными в тоннах условного топлива (далее – т у. т.), с другой стороны, равен $0,034 \cdot 10^{-9}$ т у. т./Дж [3].

Предварительная карта плотности извлекаемых ресурсов подземного тепла Минской области, составленная для интервала глубин 100–200 м с использованием указанных выше исходных данных, приведена на рис. 9.

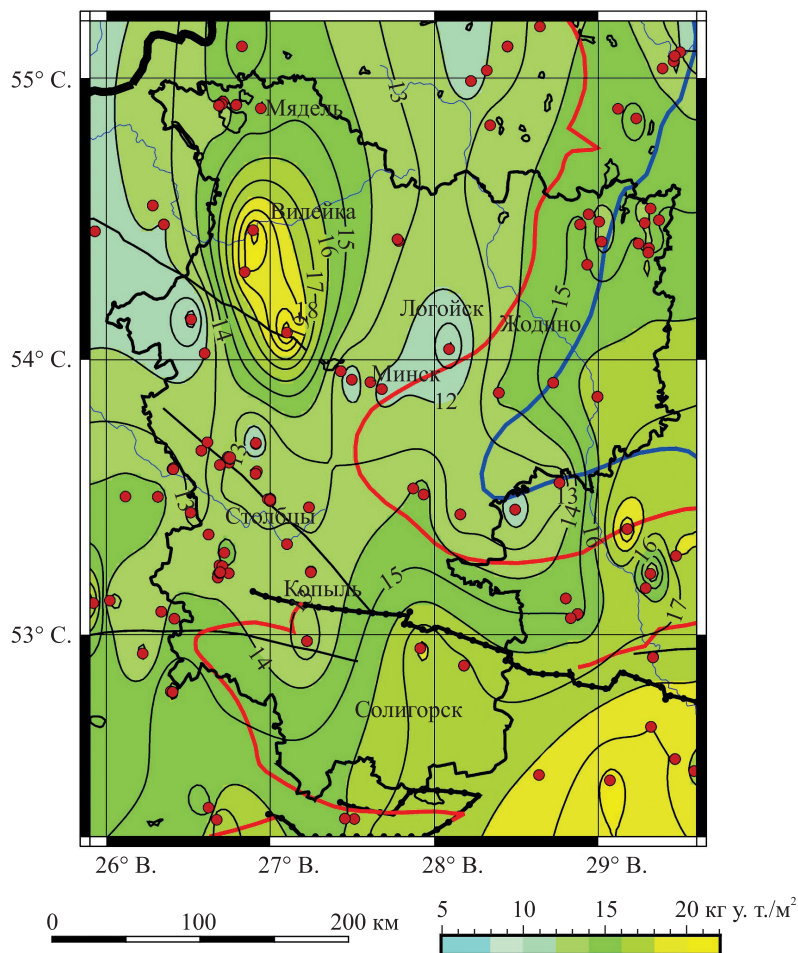


Рис. 9. Карта плотности извлекаемых ресурсов подземного тепла Минской области для интервала глубин 100–200 м. Линиями черного цвета показаны основные разломы и граница области, линиями красного и синего цвета – границы Белорусской антеклизы и Оршанской впадины соответственно. Красными кружками обозначены скважины, использованные для оценки плотности ресурсов подземного тепла

Fig. 9. Map of the distribution of the density of extractable underground heat resources in the Minsk Region for the depth interval of 100–200 m. Black lines show the main faults and the region's border, red and blue lines show the borders of the Belarusian Anticline and the Orsha Depression, respectively. Red circles indicate the wells used to estimate the density of underground heat resources

Изолинии плотности ресурсов подземного тепла изменяются от 10–11 кг у. т./м² в центральной части Минской области в окрестностях Минска и Логойска до 18–20 кг у. т./м² по направлению к Припятскому прогибу на юге и Молодечненско-Вилейской геотермической аномалии на севере региона. Значения плотности геотермальных ресурсов более 20 кг у. т./м² выявлены в Припятском прогибе за пределами Минской области (см. рис. 9, правый нижний угол карты).

Технологические схемы отбора подземного тепла

В границах исследуемого региона ресурсы низкоэнтапийной геотермальной энергии частично уже используются. Так, в Минской области созданы и введены в эксплуатацию десятки небольших геотермальных установок на базе тепловых насосов для отопления зданий и сооружений, горячего водоснабжения в жилищно-коммунальном секторе и сельском хозяйстве, осуществления сушки в различных технологических процессах и многих других назначений [9]. Как показывает практика, теплонасосные установки для извлечения подземного тепла устойчиво работают уже при температуре грунтового горизонта 7–8 °C, что обеспечивается на всей территории Минской области. В большинстве случаев на платформах для подъема пластовых вод на земную поверхность необходимо бурение скважин⁵ [10], как, например, на рис. 10.

⁵Handbook of terrestrial heat-flow density determination: with guidelines and recommendations of the International Heat Flow Commission / ed. by R. Haenel, L. Rybach, L. Stegena. Dordrecht ; Boston ; London : Kluwer Acad. Publ., 1988. XIV, 486 p. (Solid earth sciences library).

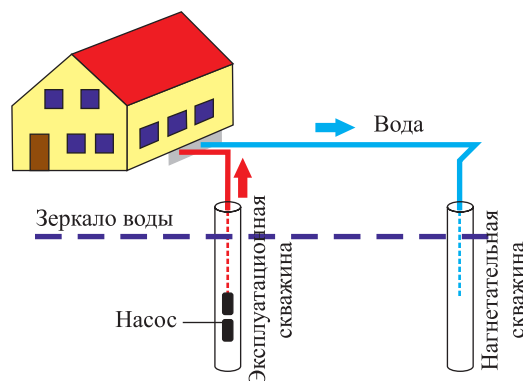


Рис. 10. Геотермальная система с открытым циркуляционным контуром.
Источник: Mands E., Sanner B. Shallow geothermal energy [Electronic resource].
URL: <http://www.ubeg.de/downloads/shallowgeothengl.pdf> (date of access: 04.11.2010)

Fig. 10. Geothermal system with an open circulation loop.
Source: Mands E., Sanner B. Shallow geothermal energy [Electronic resource].
URL: <http://www.ubeg.de/downloads/shallowgeothengl.pdf> (date of access: 04.11.2010)

Один из методов отбора подземного тепла основан на размещении в скважинах грунтовых теплообменников [11; 12]. Принципиальная схема такого теплообменника приведена на рис. 11. Его используют для реализации как прямой, так и обратной циркуляции жидкости. Расчет параметров теплообменника выполняют для каждого конкретного случая индивидуально [13].

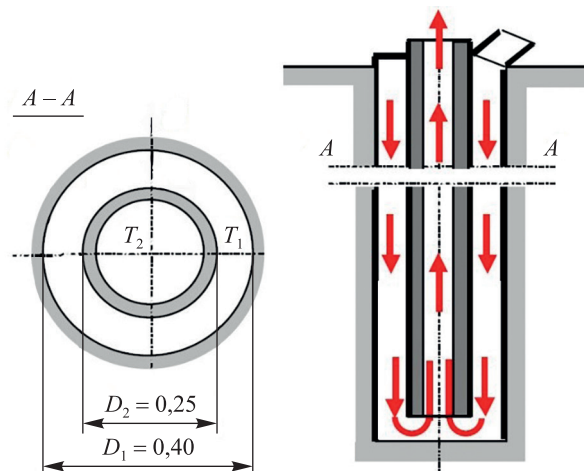


Рис. 11. Схема замкнутого циркуляционного контура в скважине (прямая циркуляция жидкости).
Источник: [13], с изменениями

Fig. 11. Scheme of a closed circulation loop in a well (direct circulation of liquid).
Source: [13], modified

Опытные работы по оценке эффективности рассмотренного метода отбора подземного тепла проведены в тестовом режиме для скважины «Березинская-1», расположенной в пределах Припятского прогиба в Светлогорском районе Минской области, с использованием замкнутого циркуляционного контура, созданного путем введения центральной трубы внутрь обсадной колонны. Полученные результаты подтвердили, что обеспечиваемая при этом тепловая мощность может достигать около 200 кВт в зависимости от глубины скважины и ее термограммы, и показали эффективность отбора подземного тепла с помощью такого теплообменника [14]. Гидравлическая связь между циркулирующей в контуре пресной водой и пластовыми водами отсутствовала. Данный теплообменник может успешно использоваться и для глубин, где присутствуют высокоминерализованные воды – крепкие рассолы.

Наиболее распространенным типом скважинных теплообменников в странах Европы является U-образный одиночный или двойной пластиковый трубопровод, погруженный в скважину (рис. 12).

На рис. 12, а, показана нижняя часть теплообменника, где выполнено соединение двух пластиковых труб с помощью наконечника, а на рис. 12, б, приведен общий вид поставленного на барабане U-образного

теплообменника, изготовленного из пластиковых труб. После их заполнения низкокипящим хладагентом (рассолом) – этиленгликолем или пропиленгликолем – создается *U*-образный циркуляционный контур, помещенный в скважину. Отбор тепла от грунта на каждый метр длины зонда может изменяться от 30 Вт до приблизительно 70 Вт в зависимости от типа грунта и его обводненности [15; 16].

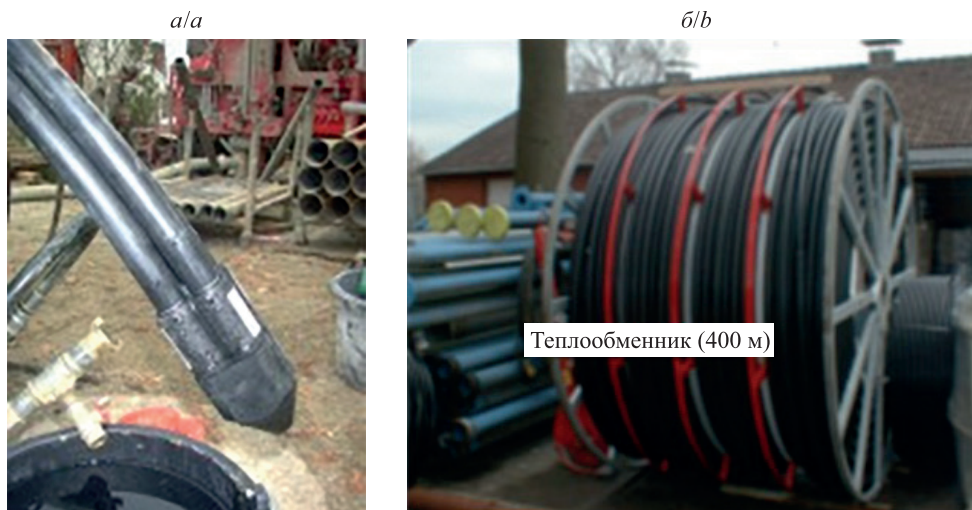


Рис. 12. Промышленные скважинные теплообменники: *a* – нижняя часть теплообменника, обеспечивающая соединение прямой и обратной пластиковых труб, перед его спуском в скважину; *б* – *U*-образный пластиковый скважинный теплообменник длиной 400 м на строительной площадке

Fig. 12. Industrial downhole heat exchangers: *a* – the lower part of the heat exchanger, which provides the connection of the direct and return plastic pipes, before lowering it into a borehole; *b* – 400 m long *U*-shaped plastic borehole heat exchanger at a construction site

На небольших глубинах (до 100 м) в ряде теплонасосных геотермальных установок на территории Минской области также используются промышленно изготавливаемые скважинные теплообменники на базе пластиковых труб⁶. После их монтажа в скважинах свободное пространство между стенкой скважины и теплообменником заполняют бентонитовой глиной для улучшения теплопередачи между массивом горных пород и циркулирующим в теплообменнике низкокипящим теплоносителем (например, жидкостью R147, не приводящей к разрушению озонового слоя при ее утечке).

Еще одним распространенным типом теплообменников является горизонтальный теплообменник, закладываемый в грунт ниже зоны промерзания, при этом конфигурация пластиковых труб в грунте может быть различной. На рис. 13 изображена кольцевая укладка. Циркулирующий в таком теплообменнике этиленгликоль или пропиленгликоль доставляет отобранное от грунта тепло к тепловому насосу.



Рис. 13. Принцип устройства горизонтального циркуляционного контура (кольцевая укладка)

Fig. 13. The principle of the horizontal circulation loop (ring laying)

⁶Зуй В. И. Основы геотермии... 287 с.

В качестве примера использования теплонасосной установки с открытым циркуляционным контуром кратко рассмотрим организацию обогрева сооружений канализационной насосной станции № 24 в д. Новый Двор Минского района. Для отопления на станции установлен тепловой насос Carrier 30NXC110 теплопроизводительностью 380 кВт. На выходе он может обеспечивать температуру до 55–60 °С. Общий вид теплового насоса и отапливаемого объекта приведен на рис. 14.



Рис. 14. Тепловой насос (а) и отапливаемый им комплекс сооружений канализационной насосной станции № 24 в д. Новый Двор Минского района (б).
Источник: [17]

Fig. 14. Heat pump (a) and the complex of buildings of sewerage pumping station No. 24 heated by it in the village of Novy Dvor, Minsk District (b).
Source: [17]

Теплонасосная установка используется для обогрева станции более 10 лет. Она смонтирована в машинном зале рядом с основным технологическим оборудованием. Благодаря наличию системы автоматики насос Carrier 30NXC110 не требует постоянного присутствия оператора. В качестве первичного источника для его питания используется пресная вода из скважины глубиной несколько десятков метров с температурой около 7–9 °С.

В зимний период на случай резкого снижения температуры наружного воздуха (до –25...–30 °С) предусмотрен также подогрев в течение нескольких дней за счет газовой котельной. В летнее время тепловой насос выводится из эксплуатации для межсезонного обслуживания.

Заключение

В результате проведенных исследований построены карты распределения температуры в Минской области на глубинах 100 и 200 м. В пределах изученного региона на этих глубинах залегают пресные подземные воды. Температура изменяется в широком диапазоне – от 7 °С до более чем 12 °С. Ее повышенные значения характерны для южной части региона, относящейся к территории Припятского прогиба.

Выполнена оценка плотности извлекаемых ресурсов геотермальной энергии. В границах Минской области плотность геотермальных ресурсов (в эквиваленте условного топлива) изменяется от 11 до 20 кг у. т./м². Наиболее высокие значения выявлены в южной части региона (Припятский прогиб) и севернее Минска в пределах Молодечненско-Вилейской геотермической аномалии. Полученные результаты показывают, что на всей территории Минской области ресурсы подземного тепла представляют интерес для практического использования.

К настоящему времени в регионе созданы несколько десятков небольших геотермальных установок для отопления зданий и сооружений. Приведен пример использования одной из них на крупной канализационной насосной станции. Кратко рассмотрены принципы отбора подземного тепла на основе технологических схем открытого и закрытого циркуляционных контуров. Отмечено, что использование пресных подземных вод в открытых циркуляционных контурах позволяет избежать технологических осложнений, имеющих место при откачке термальных рассолов (проблема выпадения кристаллов солей из пересыщенного раствора).

Показана возможность расширения практического использования подземного тепла в пределах области с применением теплонасосных геотермальных установок для различных нужд – отопления зданий и сооружений промышленного и аграрного секторов экономики, горячего водоснабжения, осуществления сушки в разных технологических процессах и др.

Библиографические ссылки

1. Беляков МФ. Геотермические измерения в Белоруссии. *Нефтяное хозяйство*. 1954;11:50–51.
2. Чекалюк ЭБ, Федорцов ИМ, Осадчий ВГ. *Полевая геотермическая съемка*. Китык ВИ, редактор. Киев: Наукова думка; 1974. 103 с.
3. Дядькин ЮД, Богуславский ЭИ, Вайнблат АБ, Остроумова ИМ, Троицкая ЕБ, Моисеенко УИ. Геотермальные ресурсы СССР. В: Моисеенко УИ, Гордиенко ВВ, редакторы. *Геотермические модели геологических структур*. Санкт-Петербург: [б. и.]; 1991. с. 168–176.
4. Кудельский АВ, Шиманович ВМ, Махнач АА. *Гидрогеология и рассолы Припятского нефтегазоносного бассейна*. Минск: Наука и техника; 1985. 223 с.
5. Кудельский АВ, Пашкевич ВИ, Карабанов АК, Павловская ИЭ, Коркин ВД. Гидросфера Беларуси на новейшем тектоническом этапе. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2000;44(6):79–83.
6. Богомолов ГВ, Цыбуля ЛА, Атрощенко ПП. *Геотермическая зональность территории БССР*. Минск: Наука и техника; 1972. 212 с.
7. Любимова ЕА, Старикова ГН, Шушпанов АН. Теплофизические исследования горных пород. В: Любимова ЕА, редактор. *Геотермические исследования*. Москва: Наука; 1964. с. 115–173.
8. Zui VI, Gribik YaG, Martynova OA, Dubanevich MA, Vasilionak EA. Geothermal field and geothermal resources in Belarus. *Litasfera*. 2016;2:108–121. EDN: VANZEM.
9. Зуй ВИ. *Тепловое поле платформенного чехла Беларуси*. Минск: Экономпресс; 2013. 256 с.
10. Buntebarth G. *Geothermics: an introduction*. Berlin: Springer-Verlag; 1984. X, 144 p.
11. Kohl T, Salton M, Rybach L. Data analysis of the deep borehole heat exchanger plant Weissbad (Switzerland). In: Iglesias E, Blackwell D, Hunt T, Lund J, Tamanyu S, Kimbara K, editors. *Proceedings of the World geothermal congress – 2000; 2000 May 28 – June 10; Kyushu – Tohoku, Japan*. Auckland: International Geothermal Association; 2000. p. 3459–3464.
12. Калинин МИ, Баранов АВ. Метод расчета глубинных теплообменников для односкважинной технологии геотермального теплоснабжения. *Разведка и охрана недр*. 2003;6:53–60.
13. Kujawa T, Nowak W. Thermal calculations of geothermal heat utilizing one-well systems with both injection and production. In: Iglesias E, Blackwell D, Hunt T, Lund J, Tamanyu S, Kimbara K, editors. *Proceedings of the World geothermal congress – 2000; 2000 May 28 – June 10; Kyushu – Tohoku, Japan*. Auckland: International Geothermal Association; 2000. p. 3483–3488.
14. Зуй ВИ, Грибик ЯГ, Сусленко АЛ. Опытные работы по созданию теплообменника в скважине «Березинская-1» Припятского прогиба. В: Высоцкий ЭА, редактор. *Проблемы региональной геологии Беларуси. IV Университетские геологические чтения, посвященные 15-летию кафедры динамической геологии БГУ; 2–3 апреля 2010 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2010. с. 69–70.
15. Fridleifsson IB, Bertani R, Huenges E, Lund JW, Ragnarsson A, Rybach L. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In: Hohmeyer O, Trittin T, editors. *Proceedings of the IPCC scoping meeting on renewable energy sources; 2008 January 20–25; Lübeck, Germany*. [S. l.]: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2008. p. 59–80.
16. Петин ЮМ, Накоряков ВЕ. Тепловые насосы. *Российский химический журнал*. 1997;41(6):107–111.
17. Zhidovich IS. Natural heat resources of the territory of Belarus: an experience of their utilization. *Geoterminis biuletenis*. 2004;5:82–86.

Получена 14.07.2025 / исправлена 26.09.2025 / принята 26.09.2025.
Received 14.07.2025 / revised 26.09.2025 / accepted 26.09.2025.