

Горные породы как полезные ископаемые геотермальных месторождений

А.Н. Шулюпин ✉

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация
✉ ans714@mail.ru

Резюме: В статье на основе анализа современного уровня развития технологий рассматриваются общие вопросы добычи геотермальной энергии из ее носителей. Отмечено наличие дефицита научно-методического и нормативного обеспечения прежде всего в горном направлении, сдерживающего развитие работ по освоению отечественных геотермальных ресурсов, что обуславливается влиянием негативных процессов в годы «перестройки». Рассмотрение геотермальных ресурсов с точки зрения теплофизики указывает на их неразрывную связь с носителями энергии. Это позволяет отнести данный вид георесурсов к группе месторождений полезных ископаемых. Отмечена особенность геотермальных месторождений, заключающаяся в возможности нахождения носителей энергии в трех фазовых состояниях: твердой, жидкой и газообразной. При этом твердые породы, в отличие от носителей в других состояниях, являются обязательной, неотъемлемой частью геотермальных месторождений. Также отмечено наличие как возобновляемых, так и невозобновляемых запасов месторождений. На примере крупнейшего отечественного геотермального месторождения (Мутновское на Камчатке) показано, что твердые породы обеспечивают около 98% невозобновляемой части запасов, способной обеспечить текущий уровень добычи энергии более 100 лет. В качестве перспективного направления освоения геотермальных ресурсов в арктической зоне указано применение тепловых насосов в комбинации с коаксиальными скважинными теплообменниками, что позволит снизить остроту проблемы растепления пород в местах активной антропогенной деятельности.

Ключевые слова: геотермальные ресурсы, горные породы, носители геотермальной энергии, горячие сухие породы, геотермальное месторождение, улучшенные геотермальные системы, тепловой насос, скважинный теплообменник

Для цитирования: Шулюпин А.Н. Горные породы как полезные ископаемые геотермальных месторождений. *Горная промышленность*. 2025;(4S):112–115. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-112-115>

Rocks as useful minerals of geothermal fields

A.N. Shulyupin ✉

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation
✉ ans714@mail.ru

Abstract: The paper discusses general issues of extracting geothermal energy from its carriers based on analyzing the currently available technologies. A lack of scientific, methodological, and regulatory support, primarily in the mining sector, due to the negative processes during the ‘perestroika’ period is noted, which hinders the development of domestic geothermal resources. Consideration of geothermal resources from the point of view of thermal physics indicates their inherent connection with the energy carriers. This allows us to classify this type of georesources as a group of mineral deposits. A specific feature of geothermal fields (deposits) is noted, which consists in the possibility to find energy carriers in three phase states, i.e. solid, liquid and gaseous. At the same time, solid rocks, unlike carriers in the other phase states, are an obligatory, integral part of geothermal fields. The presence of both renewable and non-renewable reserves of fields is also noted. Using the example of the largest domestic geothermal field (Mutnovskoye in Kamchatka), it is shown that solid rocks constitute about 98% of the non-renewable part of the reserves, capable of providing the current level of energy production for more than a 100 years. The use of heat pumps in combination with coaxial borehole heat exchangers is shown to be a promising direction for the development of geothermal resources in the Arctic zone, which will reduce the severity of the soil thawing problem in areas of active human activities.

Keywords: geothermal resources, rocks, geothermal energy carriers, hot dry rock, geothermal deposit, enhanced geothermal systems, heat pump, borehole heat exchanger

For citation: Shulyupin A.N. Rocks as useful minerals of geothermal fields. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):112–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-112-115>

Введение

Одно из активно развивающихся направлений мировой энергетики базируется на освоении геотермальных ресурсов, причем как в области электрогенерации [1; 2], так и в области прямого использования теплоносителей [3]. Доля России в мировой геотермальной электроэнергетике составляет лишь 0,5%, в прямом использовании флюидов и того меньше – 0,4% [4]. В то же время Россия обладает значительным потенциалом в этом направлении [5], и для ряда территорий, в первую очередь стратегически важного дальневосточного региона, освоение геотермальных ресурсов имеет ключевое значение. Существенный временной отрезок активного развития данного направления в мире выпал на время «перестройки», что предопределило указанное отставание, в том числе и в состоянии научно-методической базы, призванной служить идейной основой практических работ.

Освоение любых георесурсов включает три элемента: оценка, добыча и использование. Заметим, что в последнее время все большее внимание привлекает использование геотермальных флюидов не только в направлении энергетики, но и как источник ценных химических компонентов и соединений, но это отдельная тема и в настоящей работе не рассматривается. Для геотермальных ресурсов в направлении энергетики указанные элементы включают: геологическую разведку объекта освоения с определением запасов технологически доступного извлечения геотермальной энергии, добычу (извлечение из недр и доставка потребителю) геотермальной энергии, использование добытой энергии. Если первый и третий элементы, относящиеся к компетенции геологии и энергетики, к началу «перестройки» имели достаточно хорошо развитую научно-методическую базу, второй элемент, являющийся предметом горной науки, только находился в стадии становления, поэтому негативные процессы «перестройки» отразились на его развитии наиболее значительно. Это привело к наличию пробелов в отечественной методической базе освоения геотермальных ресурсов, например, отсутствию такой важной компоненты, как энергия горячих горных пород.

В настоящей работе на основе анализа современного уровня развития технологий рассматриваются общие вопросы добычи геотермальной энергии из ее носителей. Отмечается, что обязательной и наиболее значимой частью этих носителей являются горные породы, которые следует рассматривать как твердые полезные ископаемые.

Геотермальные ресурсы как месторождения полезных ископаемых

Георесурсы традиционно в горной науке делятся на шесть групп [6]:

- 1) месторождения полезных ископаемых;
- 2) горные породы вскрыши;
- 3) отходы горно-обогатительного и металлургического производства;
- 4) глубинные источники пресных, минеральных и термальных вод;
- 5) внутреннее тепло Земли;
- 6) природные и техногенные полости в земных недрах.

Геотермальные ресурсы согласно данной классификации очевидно относятся к 5-й группе. Но если обратиться к отечественной нормативной базе, единственным документом, регламентирующим освоение геотермальных ресурсов, до 2020 г. были «Правила разработки месторождений

теплоэнергетических вод» (ПБ 07-599-03, 2003), а в настоящее время – «Правила разработки месторождений подземных вод» (приказ Минприроды России от 30.07.2020 №530), т.е. теплоэнергетические воды предлагается рассматривать как разновидность подземных вод. Такой подход однозначно указывает на 4-ю группу.

Ограниченность такого подхода подтверждается практикой развития мировой геотермальной энергетики. Во-первых, в этом случае остаются вне поля зрения достаточно хорошо развитые технологии по использованию энергии горячих сухих пород [7]. Типовая схема геодинамической системы добычи энергии сухих пород предполагает, что в горячие породы с естественной или искусственно созданной проницаемостью из нагнетательной скважины поступает холодная вода, там она нагревается, и горячая вода через добычную скважину поднимается на поверхность. По сути, это пример классической геотехнологии – скважинной гидродобычи, аналогичной скважинному выщелачиванию применительно к твердым полезным ископаемым. Во-вторых, также выпадают из рассмотрения активно развиваемые технологии использования низкотемпературных источников с использованием тепловых насосов [8]. В-третьих, даже в случае разработки месторождений «теплоэнергетических вод» в значительной части фактически добывается энергия вмещающих пород [9]. Закономерно, что наиболее активно развивающееся в последнее время направление – улучшенные геотермальные системы [10; 11], предполагает неразрывную связь гидро-термальных и петротермальных ресурсов.

Иной взгляд на геотермальные ресурсы, основанный на представлениях теплофизики, предложен в [4; 12]. По современным представлениям теплота – форма передачи энергии. Материальное тело не может содержать теплоту, она характеризует процесс передачи энергии от одного тела к другому. Основным видом энергии, задействованным в тепловых процессах, является энтальпия (сумма внутренней энергии и потенциальной энергии давления), определяемая тепловым движением молекул (ранее данную величину называли «теплосодержание», в настоящее время этот термин признан устаревшим и некорректным). Для практического использования энтальпии недр необходим доступ к ее носителям – минеральным образованиям, которые при современном состоянии техники и технологий могут экономически эффективно использоваться для получения энергии, т.е. фактически являются полезными ископаемыми, а участок земной коры, содержащий их скопление, – геотермальным месторождением. Соответственно, геотермальные ресурсы с этой точки зрения можно отнести к первой группе (месторождения полезных ископаемых).

Значение твердых пород как носителей энергии геотермального месторождения

Особенность геотермальных месторождений заключается в возможности нахождения носителей энергии в трех фазовых состояниях: твердой, жидкой и газообразной. Также следует отметить наличие как возобновляемых, так и невозобновляемых запасов месторождений. Возобновляемые запасы обеспечиваются конвективными и кондуктивными тепловыми потоками от носителей энергии, находящихся вне контура месторождения, обычно на большей глубине (рис. 1). Невозобновляемые запасы заключены в доступном на данный момент времени скоплении носителей энергии.

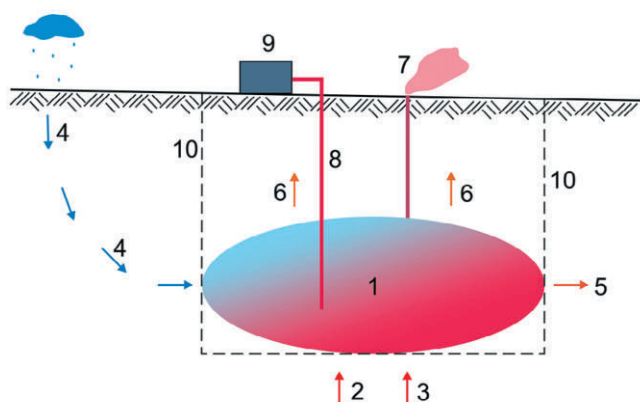


Рис. 1
Принципиальная схема геотермального месторождения:
1 – скопление носителей энергии; 2 – ювенильные флюиды; 3 – глубинный кондуктивный тепловой поток; 4 – метеорные воды; 5 – глубинная разгрузка; 6 – поверхностный кондуктивный тепловой поток; 7 – область естественной поверхностной разгрузки; 8 – добычная скважина; 9 – потребитель; 10 – контур месторождения

Fig. 1
A schematic diagram of a geothermal field:
1 – accumulation of energy carriers; 2 – juvenile fluids; 3 – deep conductive heat flux; 4 – meteoric waters; 5 – deep discharge; 6 – surface conductive heat flux; 7 – area of natural surface discharge; 8 – production well; 9 – consumer; 10 – field boundary

Современные тенденции предполагают совместное рассмотрение твердых, жидких и газообразных носителей геотермальной энергии. Отметим, что идею об отсутствии практического смысла в разделении носителей по фазам полвека назад отстаивал Ю.Д. Дядькин [9]. Но если о возможности наличия горячих сухих пород можно спорить, принимая во внимание, что реальные породы не являются абсолютно сухими, то представить гидротермальные месторождения без вмещающих пород невозможно. Горные породы являются обязательной, неотъемлемой частью геотермальных месторождений.

Оценим роль твердой фазы в невозобновляемых запасах крупнейшего отечественного геотермального месторождения – Мутновского на Камчатке. Температура носителей энергии как твердых, так и флюидов, находящихся исходно в жидком состоянии, составляет в среднем 285°C. Подъем теплоносителя на поверхность осуществляется по парлифтной технологии, которая в данном случае имеет ограничение по минимальному пластовому давлению 27 бар [4], соответствующему двухфазному состоянию флюида с температурой 228°C. Таким образом, допустимое снижение температуры пласта составляет 57°C.

Энергия одного кубического метра пласта и энергия воды в том же объеме определяются формулами

$$H = c_1 \Delta T;$$

$$H_w = \rho_w c_2 \Delta T n,$$

где H – энтальпия одного кубического метра пласта; H_w – энтальпия воды в том же объеме; c_1 – изобарная теплоемкость кубического метра пласта; ρ_w – плотность воды; c_2 – удельная изобарная теплоемкость воды; ΔT – снижение температуры в пласте; ΔT – пористость пласта.

Используя лабораторные данные по физическим свойствам пород данного месторождения и табличные зна-

чения для воды, имеем: $c_1 = 3,5 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, $\rho_w = 741 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_2 = 4,5 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $n = 18$. Подстановка в формулы дает $H = 200 \text{ МДж}/\text{м}^3$, $H_w = 3,4 \text{ МДж}/\text{м}^3$. Соответственно, доля энергии твердых пород в разрабатываемом пласте составляет 98,3%. По скромным оценкам невозобновляемых запасов на месторождении достаточно для обеспечения отбора тепловой мощности 300 МВт более 100 лет.

Роль твердой фазы в возобновляемой части запасов трудно оценить, поскольку в этом случае существенное влияние оказывает учет геологических особенностей геотермальной системы с присущей геологии неопределенностью необходимых для оценки параметров. Вероятно, роль твердой фазы в этом компоненте не так значительна, но не следует принижать значимость поступающих в контур месторождения кондуктивных тепловых потоков, распространяющихся по твердым породам.

Применение тепловых насосов в арктической зоне

Сложившееся в отечественной научно-технической сфере одностороннее восприятие геотермальных месторождений как месторождений подземных вод негативно сказывается на прогрессе в освоении геотермальных ресурсов. В частности, это относится к технологиям использования низкотемпературных носителей на базе тепловых насосов, работающих как обычный бытовой холодильник по холодильному термодинамическому циклу (рис. 2, а). Вместе с тем это направление, позволяющее извлекать энергию практически в любом месте, для России весьма перспективно, с учетом ее огромной территории. Особенно для арктической зоны в условиях вечной мерзлоты.

Для извлечения энергии по теплонасосной технологии достаточно иметь источник энергии с относительно невысокой температурой (10–20°C), что имеет место на небольшой глубине ниже многолетнемерзлых пород. В тепловом насосе аналогом морозильной камеры (испарителя, см. рис. 2, а) выступает источник тепла (породы на глубине), а в качестве конденсатора – узел обогрева.

В комбинации с тепловым насосом целесообразно применение коаксиальных скважинных теплообменников (труба в трубе, вниз по внешней трубе большего диаметра подается охлажденная жидкость, в нижних слоях она нагревается и по теплоизолированной внутренней трубе

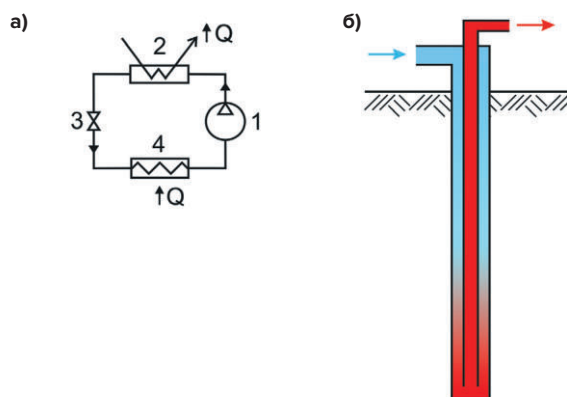


Рис. 2
Холодильный цикл (а) и коаксиальный скважинный теплообменник (б):
1 – компрессор; 2 – конденсатор (узел обогрева); 3 – дроссель; 4 – испаритель;
Q – подвод/отвод тепла

Fig. 2
Refrigeration cycle (a) and a coaxial borehole heat exchanger (b):
1 – compressor; 2 – condenser (heating unit); 3 – throttle; 4 – evaporator;
Q – heat supply/removal

подаётся вверх, рис. 2, б). При использовании соответствующих хладагентов это позволит осуществлять локальное охлаждение, включая заморозку. Такая технология снизит остроту проблемы растепления пород, особенно в местах активной антропогенной деятельности. Отбор энергии из нижних горизонтов снизит восходящий тепловой поток на границе вечной мерзлоты, а применение коаксиальных теплообменников позволит осуществлять заморозку пород вокруг скважины.

Заключение

1. С позиции горной теплофизики имеются основания рассматривать геотермальные ресурсы как георесурсы, относящиеся к группе месторождений полезных ископаемых.

2. Горные породы являются обязательной, неотъемлемой частью полезных ископаемых геотермальных месторождений. При этом их роль в запасах месторождения как минимум значительна, а для невозобновляемой части – доминирующая.
3. Перспективным направлением освоения геотермальных ресурсов в арктической зоне является применение тепловых насосов, особенно в комбинации с коаксиальными скважинными теплообменниками.
4. Необходима адаптация отечественной методической и нормативной базы освоения геотермальных ресурсов к современным реалиям мирового развития данного направления.

Список литературы / References

1. Gutiérrez-Negrín L.C.A. Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023. *Geothermal Energy*. 2024;12:14. <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00290-w>
2. Томаров Г.В., Шипков А.А. Краткий обзор современного состояния и тенденций развития геотермальной энергетики. *Теплоэнергетика*. 2023;(2):37–46. <https://doi.org/10.56304/S004036362302008X>
Tomarov G.V., Shipkov A.A. Brief review of the current status and trends in the development of geothermal energy. *Teplenergetika*. 2023;(2):37–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.56304/S004036362302008X>
3. Lund J.W., Huttner G.W., Toth A.N. Characteristics and trends in geothermal development and use, 1995 to 2020. *Geothermics*. 2022;105:102522. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102522>
4. Шулюпин А.Н., Чермошентцева А.А., Чернев И.И., Любин А.А., Варламова Н.Н. *Теоретические основы парлифтной добычи геотермальной энергии*. Хабаровск: Амурпринт; 2024. 438 с.
5. Бутузов В.А., Томаров Г.В., Алхасов А.Б., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электроэнергетика, теплоснабжение (обзор). *Теплоэнергетика*. 2022;(1):3–17. <https://doi.org/10.1134/S004036362112002X>
Butuzov V.A., Tomarov G.V., Alkhasov A.B., Badavov G.B., Aliev R.M. Geothermal energy of Russia: Resources, electric power generation, and heat supply (a review). *Teplenergetika*. 2022;(1):3–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S004036362112002X>
6. Агошков М.И. *Развитие идей и практики комплексного освоения недр*. М.; 1982. 25 с.
7. Liu Y., Zhang Y., Wang X., Bian K., Lei H. The characterization of fractures and analysis of hydraulic properties in granite-type hot dry rock reservoirs. *Geothermics*. 2025;130:103342. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103342>
8. Zhou J., Wang X., Xu J., Shi Z. Heat exchange efficiency and structural stability of assembled energy shafts: a novel shallow geothermal exploitation system for coastal urban cities. *Geothermal Energy*. 2025;13:25. <https://doi.org/10.1186/s40517-025-00350-9>
9. Дядькин Ю.Д. *Разработка геотермальных месторождений*. М.: Недра; 1989. 228 с.
10. Шулюпин А.Н., Чермошентцева А.А. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;(1):165–176. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-165-176>
Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A. Current trends in the development of geothermal resources. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(1):165–176. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-165-176>
11. Osgouei Y.T., Akin S. Experimental and numerical study of flow and thermal transport in fractured rock. *Heat and Mass Transfer*. 2021;57:1053–1068. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-03001-w>
12. Шулюпин А.Н. Геотермальные ресурсы: основные понятия и современные тенденции освоения. *Горный журнал*. 2024;(6):33–37. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.06.05>
Shulyupin A.N. Geothermal resources: Basic concepts and recent development trends. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(6):33–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.06.05>

Информация об авторе

Шулюпин Александр Николаевич – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, директор, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7379-410X>; e-mail: ans714@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.07.2025
Поступила после рецензирования: 18.08.2025
Принята к публикации: 23.08.2025

Information about the author

Alexander N. Shulyupin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Director, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7379-410X>; e-mail: ans714@mail.ru

Article info

Received: 06.07.2025
Revised: 18.08.2025
Accepted: 23.08.2025