

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>

УДК 551.24+552.578.1

Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов

А.Н. Шулюпин, Н.Н. Варламова**Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия*

На основе анализа публикаций в мировых изданиях, а также обобщения опыта освоения отечественных геотермальных месторождений, показаны современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов. Ключевой тенденцией считается переход от дотационных к коммерческим проектам, что повышает актуальность исследований в направлениях, имеющих существенное влияние на экономическую эффективность процессов освоения ресурсов, в первую очередь, в направлении геотермальных технологий. В части дотационных проектов, ставящих перед собой исследовательские цели, наиболее актуальными являются работы по направлению EGS (Enhanced Geothermal Systems – улучшенные геотермальные системы). При этом наблюдается тенденция к созданию международных междисциплинарных коллаборационных исследовательских команд. Отмечено, что современный уровень развития технологий позволяет добывать геотермальную энергию для использования в локальных системах теплоснабжения практически в любой точке Земного шара. Вместе с тем, учитывая концентрацию мощности на единицу площади, основой современной геотермальной энергетики по-прежнему является направление, связанное с подъемом на поверхность глубинных флюидов в районах, характеризующихся наличием восходящих потоков горячих ювенильных флюидов. Указано на отставание России от мирового уровня развития в области освоения геотермальных ресурсов, в том числе, в части актуальных направлений исследований и разработок, и предложены меры по преодолению указанного отставания.

Ключевые слова: геотермальная энергия, геотермальные ресурсы, горячие горные породы, подземные флюиды, геотермальное месторождение, геотермальная технология

Для цитирования: Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. (2020). Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов. *Георесурсы*, 22(4), с. 113–122. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>

Введение

Учитывая отсутствие устоявшейся терминологии в области освоения геотермальных ресурсов, представляется целесообразным определить (в авторской трактовке) основные понятия, используемые в настоящей статье. Геотермальная энергия – энтальпия пород и флюидов в недрах Земли. Геотермальные ресурсы – геотермальная энергия, которая может быть извлечена (передана) в форме теплоты для эффективного использования на существующем уровне развития технологий. Геотермальные технологии – технологии добычи из недр и доставки геотермальной энергии потребителю.

История использования геотермальной энергии насчитывает тысячелетия, при этом активное освоение геотермальных ресурсов началось во второй половине прошлого века. В настоящее время более 80 стран используют геотермальные ресурсы как непосредственный источник энергии в тепловых насосах, бальнеологических бассейнах, системах отопления и т.д. (Lund, Boyd, 2016). Более 20 стран производят электроэнергию на основе геотермальных ресурсов (Bertani, 2016). В некоторых странах, таких как Коста-Рика, Сальвадор, Исландия, Кения, Филиппины, доля геотермальной энергетики составляет 15–22% от общего производства электроэнергии. В перспективе данным способом считается возможным производить около 8,3% общей мировой электроэнергии, позволяющей обеспечивать потребность 17% мирового населения (Bertani, 2009).

Путь, по которому шло освоение геотермальных ресурсов в прошлом веке, можно охарактеризовать как экстенсивный – осваивались новые источники геотермальной энергии и разрабатывались инновационные технологии их освоения, при этом реализация проектов осуществлялась, в основном, на дотационной основе. К началу текущего века масштабы освоения геотермальных ресурсов вышли за рамки дотационных проектов, все чаще работы стали осуществляться на коммерческой основе. В новых условиях особую остроту приобретают вопросы эффективности инновационных и уже ставших традиционными технологий, что характеризует переход к интенсивному пути развития.

Наряду с новыми перспективными исследованиями, например, в области создания улучшенных геотермальных систем (Norbeck et al., 2018; Zhang et al., 2019a; Chen et al., 2019) и извлечения геотермальной энергии без подъема глубинных флюидов на поверхность (Alimonti et al., 2016; Koohi-Fayegh, Rosen, 2018; Iry, Rafee, 2019), повышенное внимание уделяется вопросам эффективности использования уже существующих технологий. Например, активно внедрявшаяся с конца прошлого века двухфазная транспортировка по трубопроводам (Lee, Jenks, 1989; Wigly, 1989; Delnov, Shulyupin, 1996; Zhao et al., 2000) получила новый импульс развития (Ghaderi, 2010; Rizaldy, 2016; Garcia-Gutierrez et al., 2015; Cheik, Ali, 2015). Также не теряют актуальность вопросы измерения расходных параметров пароводяных скважин (Banwell, 1955; James, 1970; Шулюпин, 2011; Irsamukhti et al., 2015) и моделирования в них двухфазных течений (Gould, 1974; Tachimori, 1982; Palachio, 1990; Gudmundsdottir, Jonsson, 2015; Шулюпин, Чермошенцева, 2016).

* Ответственный автор: Александр Николаевич Шулюпин
E-mail: ans714@mail.ru

© 2020 Коллектив авторов

В предлагаемой статье содержится анализ современных мировых тенденций в области освоения геотермальных ресурсов. Также, в контексте мировых тенденций, рассматривается состояние отечественной сферы исследований и разработок в данной области.

Анализ изменений приоритетов в освоении геотермальных ресурсов по тематике статей, представляемых на Всемирные геотермальные конгрессы

Всемирные геотермальные конгрессы проводятся раз в пять лет и, являясь главным смотром достижений в освоении геотермальных ресурсов, представляют обширный материал для анализа мировых тенденций развития соответствующей области. Очередной конгресс планировался к проведению в Рейкьявике (Исландия) с 27 апреля по 1 мая 2020 г. (World Geothermal Congress-2020 (WGC-2020), в настоящее время перенесен на Май 2021 г.). Прием статей на WGC-2020 закончен 30 июля 2019 г. По данным официального сайта Конгресса на конец 2019 года их было 1840, что на 40% больше количества статей на предыдущем конгрессе (WGC-2015 – 1317 (Horne, 2015)).

На WGC-2015 обстоятельный анализ публикационной активности по укрупненным направлениям исследований в области освоения геотермальных ресурсов за период с 1997 по 2014 гг. был представлен в работе (Newson, 2015). Более детальную и приближенную к настоящему времени информацию по отдельным темам может дать анализ изменения числа статей, представленных по различным тематическим разделам на WGC-2020 по отношению к аналогичным разделам на WGC-2015.

Статьи на WGC-2020 по тематике сгруппированы в 38 тематических разделов, 29 из которых полностью совпадают с тематическими разделами WGC-2015, еще 5 разделов являются модифицированными вариантами, и 4 раздела – новыми. Два тематических раздела WGC-2015 на WGC-2020 заявлены не были. Для анализа изменения числа статей по тематическим разделам предлагается использовать индекс опережающего развития – разность относительного увеличения числа статей по разделу и увеличения общего числа статей на WGC-2020 и WGC-2015, выраженная в процентах:

$$I_i = (K_{i20}/K_{i15} - K_{s20}/K_{s15})100\%,$$

где I_i – индекс опережающего развития конкретной (i -той) тематики, K_{i20} и K_{i15} – число статей в конкретном тематическом разделе на WGC-2020 и WGC-2015, K_{s20} и K_{s15} – общее число статей на WGC-2020 и WGC-2015.

Названия тематических разделов WGC-2020, число докладов и индекс опережающего развития представлены в таблице 1. Как видно из таблицы, положительную динамику имеют темы, наиболее тесно связанные с экономической эффективностью освоения геотермальных ресурсов, что является следствием, подтверждающим ранее отмеченный переход к новым условиям их освоения.

Строительство скважин обычно является одной из наиболее затратных частей геотермальных проектов. Поэтому нахождение тематического раздела «Технология бурения и завершения скважин» на первой позиции по индексу опережающего развития является ожидаемым и соответствующим новым условиям, выдвигающим повышенные требования к эффективности применяемых технологий, снижающей себестоимость получаемой продукции. Также

| № | Тематический раздел | K_{i15} | K_{i20} | $I_i, \%$ |
|----|---|-----------|-----------|-----------|
| 1 | Технология бурения и завершения скважин | 35 | 85 | 103 |
| 2 | Передовая технология (магма, геодавление и т.д.) | 11 | 24 | 78 |
| 3 | Фактические истории | 29 | 52 | 39 |
| 4 | Геология | 85 | 149 | 35 |
| 5 | Коррозия и отложения | 42 | 72 | 31 |
| 6 | Бизнес-стратегии | 18 | 30 | 27 |
| 7 | EGS – Улучшенные геотермальные системы | 59 | 94 | 19 |
| 8 | Разведка | 92 | 145 | 18 |
| 9 | Производственная технология, системы сбора пара | 25 | 39 | 16 |
| 10 | Геотермальное образование | 18 | 28 | 16 |
| 11 | Экономика и финансирование | 16 | 25 | 16 |
| 12 | Программное обеспечение для геотермальных приложений | 27 | 39 | 4 |
| 13 | Геофизика | 109 | 151 | -1 |
| 14 | Геохимия | 99 | 128 | -11 |
| 15 | Прямое использование | 40 | 50 | -15 |
| 16 | Новые данные стран | 77 | 90 | -23 |
| 17 | Управление месторождением | 20 | 23 | -25 |
| 18 | Геотермальные тепловые насосы | 56 | 63 | -28 |
| 19 | Технология резервуара | 108 | 109 | -39 |
| 20 | Интегрированные энергетические системы, каскадное использование | 12 | 12 | -40 |
| 21 | Здоровье, туризм и бальнеология | 7 | 7 | -40 |
| 22 | Геомикробиология | 1 | 1 | -40 |
| 23 | Ключевое примечание | 1 | 1 | -40 |
| 24 | Выработка электроэнергии | 74 | 69 | -47 |
| 25 | Гидрогеология | 34 | 31 | -49 |
| 26 | Оценка ресурсов | 80 | 71 | -51 |
| 27 | Извлечение минералов и переработка | 8 | 7 | -53 |
| 28 | Технология закачки | 17 | 14 | -58 |
| 29 | Другие | 2 | 1 | -90 |
| 30 | Экологические аспекты | 48 | 56 | 50 |
| 31 | Социальные и культурные аспекты | | 35 | |
| 32 | Местное теплоснабжение | 17 | 27 | 42 |
| 33 | Агрокультура | | 4 | |
| 34 | Политические, правовые и регулирующие аспекты | 27 | 44 | 23 |
| 35 | Устойчивое развитие и изменение климата | | 34 | - |
| 36 | Тепло/газ/нефть/угольные месторождения | | 12 | - |
| 37 | Большие данные и аналитика данных | | 12 | - |
| 38 | Международное сотрудничество | | 6 | - |
| | Сумма | 317* | 1840 | 0 |

Табл. 1. Тематические разделы на WGC-2020 и индекс опережающего развития по разделам. *Значение приведено с учетом разделов, не представленных на WGC-2020.

закономерно нахождение на второй позиции тематического раздела «Передовая технология (магма, геодавление и т.д.)», отражающего поиск прорывных технологических решений. Накопление опыта в относительно недолгой истории активного освоения геотермальных ресурсов обуславливает нахождение на третьей позиции тематического раздела «Фактические истории».

Отдельно следует рассмотреть тематический раздел «EGS – Улучшенные геотермальные системы» (Enhanced Geothermal Systems). На конгрессах данный раздел появился в 2010 году и рассматривался как приемник тематики HDR (Hot Dry Rock – горячие сухие породы), которая в 2005 рассматривалась в разделе «Передовая технология». Т.е. тематика HDR за десять лет перешла из раздела «Передовая технология» к разделу EGS. Заметим,

что тематика EGS может иметь значительно более широкую трактовку, нежели это делается на Конгрессах. Например, часто статьи по стимулированию притока к скважине относятся к тематике «Технология резервуара» (On, Andrino, 2015; Pasikki et al., 2010; Siratovich et al., 2015). В то же время, на широко известном ежегодном семинаре при Стэнфордском университете вопросы стимулирования рассматриваются в контексте EGS (Aguilar, Myers, 2019; Lu, Ghassemi, 2019; Ye et al., 2019). Как отмечено в (Newson, 2015), общее количество статей по тематике EGS к 2014 году приблизилось к 20% от общего количества статей по освоению геотермальных ресурсов.

Также высокие позиции имеет впервые появившаяся на конгрессах в 2010 году тематика «Производственная технология, системы сбора пара», имеющая непосредственное отношение к повышению эффективности процессов освоения ресурсов. Заметим, что в отечественной практике применительно к вопросам данной тематики ранее активно использовалось подзабытое к настоящему времени определение направления «Обустройство геотермальных промыслов».

Согласно данным таблицы, среди тематик с понижающимся интересом оказалось ранее весьма востребованное направление «Выработка электроэнергии». Данный факт не следует рассматривать как тенденцию к потере интереса к указанной тематике в принципе. Указанная тенденция является следствием того, что технологии данного направления уже хорошо изучены, и со временем все труднее в нем найти исследовательский интерес.

Также отмечено снижение интереса к тематике «Оценка ресурсов». Это можно объяснить смещением акцента в отношении ресурсной базы в пользу практических работ, отраженным в росте статей по тематике «Разведка», что выражает общую тенденцию к акценту на работы, имеющие непосредственное отношение к эффективности освоения ресурсов.

Нельзя обойти вниманием последнюю позицию, не считая статистически незначимую тематику «Другие», тематики «Технология закачки». В 80-х годах прошлого века закачка считалась важнейшим аспектом разработки геотермальных месторождений как в части обеспечения экологических запросов, так и по аналогии с разработкой месторождений жидких и газообразных полезных ископаемых в части наиболее полного использования ресурсов. Опыт применения закачки на различных месторождениях мира не всегда оправдывал ожидания. Например, неоправданные надежды на восполнение ресурсов посредством закачки стали одной из причин снижения установленной мощности электростанций с 1990 г. по 2004 г. на 346 МВт на (Lund et al., 2010) на месторождении Гейзеры (Geysers, США). Заметим, что при этом объем реально демонтированного оборудования в четыре раза превосходит установленную мощность всех геотермальных электростанций России. Кроме неоправданного положительного эффекта закачка может иметь и отрицательный эффект. В работе (Васянович и др., 2019) показано, что снижение энтальпии флюида в геотермальном резервуаре в результате закачки способно привести к раннему выходу из строя добычной скважины, эксплуатирующийся в режиме парлифта.

Тематические разделы, указанные в таблице за номерами 30 и 31 на WGC-2015 были объединены под тематикой

«Экологические и социальные аспекты». В таблице приведены данные сравнения двух указанных разделов WGC-2020 с соответствующим разделом WGC-2015. Возросший интерес к данным тематикам, а также расширение круга вопросов за счет рассмотрения культурных аспектов определили высокое значение индекса.

Тематические разделы, указанные в таблице за номерами 32 и 33 на WGC-2015 также были объединены под одной тематикой «Местное теплоснабжение и агрокультура». Тематический раздел, указанный в таблице за номером 34, ранее был представлен двумя разделами «Правовые и регулирующие аспекты» и «Энергетическое ценообразование и правила». Значения индексов также указывают на возросший интерес к данным тематикам.

В представленной таблице за цифрами 35–38 указаны новые тематические разделы, появившиеся в 2020 году. При этом раздел «Устойчивое развитие и изменение климата» в некоторой степени может рассматриваться как расширенный вариант тематического раздела «Устойчивое развитие», представленного на WGC-2015 девятью публикациями. Заметим, что интерес к вопросам использования нефтяных и газовых скважин для извлечения геотермальной энергии возродился в 1999 г. после почти двадцатилетнего забвения (Newson, 2015).

Два тематических раздела: «Горячие осадочные водоносные пласты» (Hot Sedimentary Aquifers, HSA) и «Механизм чистой разработки», имевшие место на WGC-2015 с числом статей 11 и 3, соответственно, в 2020 году не заявлены. Статьи по вопросам, относящимся к указанным тематикам, на WGC-2020 будут рассматриваться в рамках других тематических разделов.

В целом, динамика числа статей, представленных на WGC-2020 по различным тематическим разделам, показывает повышение актуальности вопросов, связанных, в конечном счете, со снижением затрат и рисков при освоении ресурсов. Следует отметить, что в первой десятке по индексу опережающего развития в таблице половина тематических разделов имеет непосредственное отношение к геотермальным технологиям. В этой связи геотермальные технологии можно считать наиболее актуальным направлением для исследований в области освоения геотермальных ресурсов.

Мировые тенденции в освоении геотермальных ресурсов

Анализ статей, представленных на Всемирные геотермальные конгрессы, по тематике дает полезную, но не исчерпывающую информацию о современных мировых тенденциях в области освоения геотермальных ресурсов. Дополнительную информацию дает анализ публикаций в ведущих специализированных изданиях и изданиях по смежным областям, которых немало ввиду наличия множества вопросов, требующих междисциплинарного подхода к их решению.

Несколько лет назад существенно активизировались исследования процессов и технологий использования скважинных теплообменников. Это нашло отражение в ряде публикаций в ведущих специализированных изданиях в области освоения геотермальных ресурсов (Alimonti et al., 2016; Holmberg et al., 2016; Michalski, Klitzsch, 2019). Интерес к указанной тематике сохраняется и по сей день

(Koochi-Fayegh, Rosen, 2018; Iry, Rafee, 2019; Michalski, Klitzsch, 2019), и его можно связать с развитием локальных систем теплоснабжения, использующих тепловые насосы.

Тепловой насос, работающий по обратному термодинамическому циклу (принципу хорошо известного холодильника), позволяет перекачивать энергию в форме тепла от относительно холодного тела к теплоте. При этом количество энергии, получаемой в форме тепла в обогреваемом месте, превосходит работу, затрачиваемую на перекачку энергии. Относительно постоянная, не подверженная сезонным изменениям и достаточно высокая температура недр, даже на небольших глубинах, приемлема для объекта, используемого в качестве теплоисточника. Использование скважинных теплообменников позволяет добывать геотермальную энергию без подъема глубинных флюидов на поверхность, более того, допускает возможность эффективной работы даже при отсутствии глубинных флюидов. Современный уровень развития технологий скважинных теплообменников и теплонасосной техники позволяет добывать геотермальную энергию практически в любой точке Земного шара для использования в локальных системах теплоснабжения.

Анализируя современное состояние в мировой сфере исследований и разработок, трудно обойти вниманием возрастающую роль китайских ученых. Не располагая такими легкодоступными высокопотенциальными геотермальными месторождениями как Италия, США, Новая Зеландия, Исландия, Россия и др., Китай уже вышел в лидеры по направлению прямого использования геотермальной энергии (Lund, Boyd, 2016). При этом активно исследуются вопросы использования энергии горячих сухих пород (Xu et al., 2019; Zhang et al., 2019b). Нет сомнений, что усилиями китайских коллег данное направление, совместно с применением скважинных теплообменников и тепловых насосов, будет развиваться и в дальнейшем.

Ранее, при рассмотрении развития тематик на Всемирных геотермальных конгрессах, отмечалось, что направление по использованию энергии горячих сухих пород (HDR) из самостоятельных передовых технологий трансформировалось в раздел направления по созданию и разработке улучшенных геотермальных систем (EGS). Это объясняется наличием множества общих вопросов, касающихся извлечения энергии как сухих пород, так и обводненных, слабопроницаемых пластов, требующих для эффективной эксплуатации улучшения их характеристик, например, увеличения проницаемости в геотермальном резервуаре путем температурного стимулирования (Siratovich et al., 2015a).

Рассмотрению вопросов создания и разработки улучшенных геотермальных систем в настоящее время посвящается множество публикаций как в специализированных изданиях, так и в ведущих изданиях по смежным наукам (Zhang et al., 2019a). Это свидетельствует о том, что данное направление в настоящее время находится в состоянии активной разработки. При этом, учитывая наличие междисциплинарных вопросов, отмечается тенденция к созданию коллаборационных команд (Chen et al., 2019).

Как было отмечено, современный уровень развития геотермальных технологий позволяет добывать геотермальную энергию даже в районах, не имеющих температурных

аномалий, т.е. практически везде. Вместе с тем, основой современной геотермальной энергетики по-прежнему является направление, связанное с подъемом на поверхность глубинных флюидов (в России данное направление ассоциируется с разработкой месторождений теплоэнергетических вод). Отметим, что высокая эффективность конвективной теплопередачи обеспечивает значительную, привлекательную для практического использования, тепловую мощность в районах, характеризующихся наличием восходящих потоков горячих ювенильных флюидов. Поэтому, если говорить о создании мощных объектов геотермальной энергетики, например, геотермальных электростанций, то ближайшие перспективы следует связывать именно с геотермальными месторождениями, формируемыми восходящими потоками горячих ювенильных флюидов, которые, как правило, привязаны к областям повышенной вулканической активности.

На современном этапе освоение высокопотенциальных геотермальных месторождений все чаще осуществляется на коммерческой основе. Это вынуждает геотермальную энергетику равноправно, без каких-либо предпочтений конкурировать на энергетическом рынке. Отмечались случаи, когда геотермальной энергетике приходилось успешно конкурировать с традиционными видами, имеющими дотационную поддержку (Колесников и др., 2015). В таких условиях вопросы себестоимости продукции приобретают ключевое значение.

Возможности снижения себестоимости продукции за счет развития технологий использования геотермальной энергии не так велики. В направлении прямого использования поставляемой продукцией являются непосредственно геотермальные флюиды. В направлении электроэнергетики геотермальные электростанции по принципу работы представляют собой хорошо изученные тепловые станции. Есть некоторая специфика в работе бинарных геотермальных электростанций, использующих в качестве рабочих тел агенты с низкой температурой кипения (фреон, изопентан и т.д.). Тем не менее, основной резерв в снижении себестоимости продукции заключен в совершенствовании технологий добычи и транспортировки геотермальной энергии к потребителю, т.е. в совершенствовании геотермальных технологий.

Геотермальные технологии объединяют наиболее важные специфические вопросы практического освоения геотермальных ресурсов, например, такие как стимулирование продуктивных пластов (Siratovich et al., 2015b), возбуждение парлифтных скважин (Mubarok, Zarrouk, 2017), совершенствование системы транспортировки теплоносителя (Rizaldy, Zarrouk, 2016), обеспечение устойчивого режима работы добычных скважин (Shulyupin, Chernev, 2015).

Таким образом, важной характеристикой современного этапа освоения геотермальных ресурсов является тенденция к переходу от дотационных к коммерческим проектам. Эта тенденция практической сферы повышает актуальность исследований в области геотермальных технологий, наиболее отчетливо отражающей специфику процессов освоения данных ресурсов и имеющей существенное влияние на их экономическую эффективность.

В части дотационных проектов, ставящих перед собой не только коммерческие, но и исследовательские

цели, наиболее актуальными являются работы в рамках направления EGS – улучшенные геотермальные системы. В исследовательской части данное направление включает многие вопросы геотермальных технологий.

Состояние отечественной сферы исследований и разработок в области освоения геотермальных ресурсов

Согласно обобщению данных, представленных на WGC 2015 по странам, Россия, находясь в числе ведущих стран по располагаемым геотермальным ресурсам, по масштабам их освоения в прямом использовании находится на 23 месте (Lund, Boyd, 2016), а по установленной мощности ГеоЭС – на 14 месте (Bertani, 2016). Сравнивая динамику развития указанных направлений в России и мире за последние годы, можно предположить, что в настоящее время позиции России находятся еще ниже.

К началу перестройки Россия располагала одной из самых развитых в мире сферой исследований и разработок в области освоения геотермальных ресурсов, соответствующей масштабности планов по их освоению. Например, к концу прошлого века планировалось всю энергетику Камчатки перевести на геотермальные ресурсы. Вопросами разведки геотермальных месторождений активно занимались в Институте вулканологии (г. Петропавловск-Камчатский) В.В. Аверьев, В.М. Сугробов и др., вопросами разработки геотермальных месторождений занимались в Ленинградском горном институте (г. Санкт-Петербург) Ю.Д. Дядькин, Ю.М. Парийский и др., вопросами геотермальных электростанций занимались в ЭНИНе (г. Москва) Д.А. Лабунцов, Ф.Г. Соломозода и др., комплексом вопросов занимались во ВНИПИгеотерм (г. Махачкала) Г.М. Гайдаров, Ф.Г. Шарифутдинов и в его Камчатском комплексном отделе (г. Петропавловск-Камчатский) Г.Н. Забарный, Р.И. Пашкевич, А.Н. Шулюпин и др. Отдельные разработки выполнялись в Институте теплофизики (г. Новосибирск), Казанском госуниверситете (г. Казань), Центральном котлотурбинном институте (г. Санкт-Петербург), изучением геотермальных ресурсов занимались и в других вузах и научных учреждениях России. Активная научная работа проводилась также в производственных организациях Камчатки: РЭУ «Камчатскэнерго», Камчатском управлении по использованию глубинного тепла Земли, Гидрогеологической экспедиции ПГО «Камчатгеология», Гидрогеологической экспедиции ПГО «Сахалингеология» и др.

Проблемы конца прошлого века, связанные с так называемой «перестройкой», негативно отразились на сфере исследований и разработок, прежде всего в области технических наук, в том числе в области освоения геотермальных ресурсов. Тем не менее, созданного задела хватило для успешной реализации Мутновского проекта, итогом которого стало строительство и введение в эксплуатацию в 1999 и 2003 г. двух электростанций на Камчатке, суммарной установленной мощностью 62 МВт, чему в немалой степени содействовал предпринимательский талант О.А. Поварова. Данные станции до сих пор являются флагманами отечественной геотермальной энергетики, вырабатывающими более 80% отечественной электроэнергии на геотермальных ресурсах.

В последнее время после примерно двадцатилетнего

периода упадка наблюдается тенденция к возрастанию, по большей части декларативного, интереса к отечественным геотермальным ресурсам и незначительное оживление в соответствующей сфере исследований и разработок. Указанная тенденция обусловлена декларированием стратегического курса на развитие Российских регионов, располагающих доступными запасами геотермальной энергии (Камчатка, Курилы, Кавказ). Тем не менее, часто геотермальные ресурсы выпадают из области внимания конкретных программ и проектов.

В настоящее время планомерная работа по геотермальной тематике ведется в ряде отечественных вузов и научных организаций. В Институте проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиале ОИВТ РАН (г. Махачкала) ведутся исследования по комплексу тем, связанных с использованием низкопотенциальных термальных вод (Алхасов, Алхасова, 2019), в том числе по вопросам выделения компонентного состава геотермальных рассолов (Рамазанов и др., 2019), а также по технологии циркуляционной системы добычи геотермальной энергии (Алишаев, 2019). Изучение циркуляционных систем добычи геотермальной энергии осуществляется также в Грозненском государственном нефтяном техническом университете им. ак. М.Д. Миллионщикова (г. Грозный) (Илюхин и др., 2015). Планомерные работы по моделированию геотермальных резервуаров ведутся в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) (Басманов и др., 2016; Кирюхин и др., 2018). В Научно-исследовательском геотехнологическом центре ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) занимаются моделированием геотермальных систем (Пашкевич и др., 2015; Pashkevich, Mamaev, 2019), разработкой технологии EGS, в том числе при создании проницаемых зон в сверхкритических геотермальных резервуарах, вопросами использования отработанных теплоносителей (Горбач, 2014; Gorbach, 2019), извлечения ценных компонентов из геотермальных растворов (Belova, 2019; Попов, Пашкевич, 2018; Potarov et al., 2020), вопросами защиты окружающей среды при разработке геотермальных месторождений (Веселко, 2018), а также разработкой технологических схем промышленных геотермальных комплексов. Парлифтная технология добычи геотермальных флюидов изучается в Институте горного дела ДВО РАН (г. Хабаровск) (Шулюпин, 2019).

Представленный перечень организаций позволяет сделать вывод о наличии центробежной тенденции в географии сферы исследований и разработок – в перечне не представлены центральные регионы России. Это настораживающая тенденция. Заметим, что обычно именно центральные регионы определяют научно-техническую политику, и отсутствие их протекции сказывается на внутрироссийском авторитете научного направления.

Значительная часть отечественных исследований основывается на численном моделировании процессов теплообмена в геотермальных системах. В международной практике подобные исследования принято относить к тематике «Технологии резервуара», которая, как показывают данные таблицы 1, теряет свои позиции. То же самое, но в несколько меньшей степени, можно сказать в отношении исследований по выделению компонентного состава геотермальных флюидов. Несмотря на

наличие в геотермальных флюидах большого количества ценных компонентов (Шулюпин, Чернев, 2012), малая концентрация является существенным препятствием для создания эффективной технологии их извлечения. В то же время, некоторые наиболее актуальные темы, в том числе относящиеся к развитию геотермальных технологий, вовсе не входят в круг внимания отечественной сферы исследований и разработок. Это указывает на ее неполное соответствие современным мировым тенденциям.

Исторически, в освоении отечественных геотермальных ресурсов высокую активность проявляли специалисты в области гидрогеологии. Под их влиянием в значительной степени формировалась отечественная сфера исследований и разработок, подготавливались регламентирующие документы. Например, основным документом, регламентирующим разработку геотермальных месторождений, являются Правила разработки месторождений теплоэнергетических вод (ПБ 07-599-03, 2003). В указанном документе проводится прямая аналогия геотермального месторождения с месторождением подземных вод. Такой подход ограничивает рассматриваемые ресурсы геотермальной энергии только энтальпией подземных флюидов, исключая из рассмотрения энтальпию вмещающих пород. Зарубежный опыт, о чем писал еще 30 лет назад Ю.Д. Дядькин (Дядькин, 1989), предполагает рассмотрение в качестве источника энергии как флюиды, так и сухие породы. Соответственно, оценка ресурсов месторождения, разрабатываемого путем добычи флюидов, должна осуществляться с учетом энергии вмещающих пород. отождествление геотермальных месторождений с месторождениями подземных вод не дает полного представления о располагаемых ресурсах и может негативно влиять на выбор технологий их освоения.

Указанный ограниченный взгляд на разработку геотермальных месторождений тормозит развитие отечественной сферы исследований и разработок. Известно, что возможность опубликования работ является существенным стимулом для проведения исследований. Некоторые отечественные издания горного профиля отказываются принимать статьи по геотермальной тематике, ссылаясь на приверженность к твердым полезным ископаемым. Некоторые издания по водным ресурсам также не признают геотермальную тематику своей. Еще раз отметим, что с некоторыми допущениями при освоении геотермальных ресурсов, полезным ископаемым, т.е. минеральным образованием земной коры, обладающим необходимыми физическими свойствами (высокая энтальпия), выступают как флюиды, так и сухие породы, причем наличие пород, в отличие от флюидов, является обязательным.

Развитию отечественных исследований в области освоения геотермальных ресурсов также не способствует отсутствие формализации некоторых актуальных для данной области направлений в действующей Номенклатуре специальностей научных работников, что не позволяет задействовать такой эффективный механизм стимулирования научных работников, как защита диссертаций по соответствующей их работе специальности. Например, активно развивающееся в мире направление геотермальной технологии по существу должно являться разделом специальности 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)». Заметим, что пример использования

циркуляционных систем для добычи геотермальной энергии является аналогом классического примера геотехнологии – скважинного выщелачивания. Однако в паспорте специальности есть указание на твердые полезные ископаемые, а как уже отмечалось в отечественной научной сфере доминирует однобокое понимание геотермальных ресурсов. В результате нет формальных оснований для выполнения диссертационной работы по указанной специальности.

Несмотря на трудности, отечественная сфера исследований и разработок в области освоения геотермальных ресурсов жива и развивается. Работы, проводимые в ранее отмеченных отечественных научных организациях, выполняются на современном мировом уровне, результаты публикуются в ведущих мировых изданиях (Pashkevich, Muratov, 2015; Shulyupin, Chernev, 2015; Kiryukhin et al., 2017).

Для повышения эффективности процессов освоения отечественных геотермальных ресурсов необходимо адаптировать сферу исследований и разработок к современным мировым тенденциям в данной области. Необходимо преодолеть однобокое восприятие геотермальных месторождений как месторождений подземных вод и разработать новую нормативно-методическую базу их освоения. Целесообразно сформировать более широкое представление о научной специальности «Геотехнология», охватывающее геотермальные технологии.

Выводы

1. Важной характеристикой современного этапа освоения геотермальных ресурсов является тенденция к переходу от дотационных к коммерческим проектам. Эта мировая тенденция повышает актуальность исследований в направлениях, наиболее отчетливо отражающих специфику процессов освоения данных ресурсов и имеющих существенное влияние на их экономическую эффективность, в первую очередь, в области геотермальных технологий.

2. В части дотационных проектов, ставящих перед собой не только коммерческие, но и исследовательские цели, наиболее актуальными являются работы в рамках направления EGS – улучшенные геотермальные системы. Один из разделов этого направления представляют рассматриваемые некогда отдельно проекты HDR (горячие сухие породы).

3. Современный уровень развития технологий скважинных теплообменников и теплонасосной техники позволяет добывать геотермальную энергию практически в любой точке Земного шара для использования в локальных системах теплоснабжения. Вместе с тем, основой современной геотермальной энергетики по-прежнему является направление, связанное с подъемом на поверхность глубинных флюидов, обеспечивающих привлекательную для практического использования в крупных объектах энергетики тепловую мощность в районах, характеризующихся наличием восходящих потоков горячих ювенильных флюидов.

3. В настоящее время имеет место отставание России в области освоения геотермальных ресурсов от соответствующего мирового развития, в том числе, в части актуальных направлений исследований и разработок.

4. Для повышения эффективности процессов освоения отечественных геотермальных ресурсов необходимо адаптировать сферу исследований и разработок к современным мировым тенденциям в данной области. Необходимо преодолеть однобокое восприятие геотермальных месторождений как месторождений подземных вод и разработать новую нормативно-методическую базу их освоения.

5. Для стимулирования отечественных исследований по наиболее активно развиваемому мировому направлению исследований в области освоения геотермальных ресурсов, целесообразно внесение геотермальной технологии в области исследований специальности 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)».

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-15-50084.

Литература

- Алишаев М.Г. (2019). Оценка показателей циркуляционной системы добычи геотермальной энергии в случае малоомощного пласта. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 1, с. 140–158. <https://doi.org/10.1134/S0002331019010047>
- Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. (2019). Комплексное использование низкопотенциальных термальных вод Юга России для тепло-, водоснабжения и решения экологических проблем. *Теплоэнергетика*, 5, с. 82–88. <https://doi.org/10.1134/S0040363619050011>
- Басманов О.Л., Кириухин А.В., Магуськин М.А., Двигало В.Н., Рутквист Дж. (2016). Термогидрогеомеханическое моделирование вертикальных деформаций земной поверхности при эксплуатации Мутновского геотермального месторождения. *Вулканология и сейсмология*, 2, с. 70–82. <https://doi.org/10.1134/S0742046316020032>
- Васянович Ю.А., Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. (2019). Оценка предельного пластового давления для парлифтной добычи флюида на Мутновском геотермальном месторождении. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, S30, с. 25–32. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-8-30-25-32
- Веселко А.Ю. (2018). Концептуальная модель воздействия эксплуатации геотермальных месторождений на окружающую среду. *Геология, география и глобальная энергия*, 3, с. 38–42.
- Горбач В.А. (2014). Проблемы утилизации отработанных геотермальных растворов. *Георесурсы*, 3(58), с. 44–48. <https://doi.org/10.18599/grs.58.3.9>
- Дядькин Ю.Д. (1989). Разработка геотермальных месторождений. Москва: Недра, 229 с.
- Илюхин А.В., Минцаев М.Ш., Исаева М.Р. и др. (2015). АСУТП опытно-промышленной геотермальной станции с циркуляционной схемой отбора тепла на Ханкальском месторождении Чеченской Республики. *Мат. между. научно-практ. конф.: Geoenergy*. Грозный: Алеф, с. 233–240.
- Кириухин А.В., Федотов С.А., Кириухин П.А. (2018). Магматические системы и условия глубинной гидротермальной циркуляции Ключевской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и термогидродинамического моделирования. *Вулканология и сейсмология*, 4, с. 3–14. <https://doi.org/10.1134/S0742046318040036>
- Колесников Д.В., Шулюпин А.Н., Любин А.А. (2015). Проблемы эксплуатации ГеоЭС Камчатки. *Электрические станции*, 4, с. 16–19. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0601-7>
- Пашкевич Р.И., Мамаев Д.В., Павлов К.А. (2015). Термогидродинамическое моделирование Авачинской геотермальной системы с учетом данных термометрии и космических снимков. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, S63, с. 63–78.
- ПБ 07-599-03. Правила разработки месторождений теплоэнергетических вод. (2003). Москва.
- Попов Г.В., Пашкевич Р.И. (2018). Кинетика ионного обмена лития из растворов в статических условиях. *Башкирский химический журнал*, 25(4), с. 46–49. <https://doi.org/10.17122/bcj-2018-4-46-49>
- Рамазанов М.М., Каракин А.В., Лобковский Л.И. (2019). Математическая модель движения растворов с учетом осмотического эффекта. *Доклады Академии наук*, 489(1), с. 75–79. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652489175-79>
- Шулюпин А.Н. (2011). Вопросы гидравлики пароводяной смеси при освоении геотермальных месторождений. Владивосток: Дальнаука, 262 с.
- Шулюпин А.Н. (2019). Способы обеспечения устойчивой работы пароводяных скважин. *Георесурсы*, 21(1), с. 99–106. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.99-106>
- Шулюпин А.Н., Чермошнцева А.А. (2016). Семейство математических моделей WELL-4 для расчета течений в пароводяных геотермальных скважинах. *Математическое моделирование*, 28(7), с. 56–64.
- Шулюпин А.Н., Чернев И.И. (2012). Проблемы и перспективы освоения геотермальных ресурсов Камчатки. *Георесурсы*, 1(43), с. 19–21.
- Aguiar A.C., Myers S.C. (2019). Microseismic Focal Mechanisms and Implications for Changes in Stress During the 2014 Newberry EGS Stimulation. *Proc. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford. <https://doi.org/10.1785/0120190011>
- Alimonti C., Berardi D., Bocchetti D., Soldo E. (2016). Coupling of energy conversion systems and wellbore heat exchanger in a depleted oil well. *Geothermal Energy*, 4(11), 17 p. <https://doi.org/10.1186/s40517-016-0053-9>
- Banwell C.J. (1955). Physical investigations. *Geothermal steam for power in New Zealand*. New Zealand, 117, pp. 45–74.
- Belova T.P. (2019). XRD-investigations of the mechanism of lithium sorption from the separated liquid of the Pauzhetskaya geothermal power plant (Kamchatka) by modified zeolites. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 367, 4 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/367/1/012004>
- Bertani R. (2009). Geothermal energy: an overview on resources and potential. *Proc. Int. Conf. on national development of geothermal energy use*. Slovakia, 17 p.
- Bertani R. (2016). Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report. *Geothermics*, 60, pp. 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003>
- Cheik H.S., Ali H.A. (2015). Prefeasibility design of single flash in Asal geothermal power plant 2x25 MW, Djibouti. *Proc. World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 25030.
- Chen Y., Huang L., EGS Collab Team. (2019). Optimal design of 3D borehole seismic arrays for microearthquake monitoring in anisotropic media during stimulations in the EGS collab project. *Geothermics*, 79, pp. 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.01.009>
- Delnov Y., Shulyupin A. (1996). Geothermal power generation in Kamchatka, Russia. *Proc. Annual Meet. of the Geothermal Resources Council: Transactions – geothermal resources council*. Portland, 20, pp. 733–736.
- Garcia-Gutierrez A., Martinez-Estrella J.I., Ovando-Castelar R., Vazquez-Sandoval A., Rosales-López C. (2015). Thermal Efficiency of the Los Humeros Geothermal Field Fluid Transportation Network. *Proc. World Geothermal Congress-2015*. Melbourne, Australia, 25007.
- Ghaderi I. (2010). Comprehensive comparison between transmission two-phase flow in one line and two line separately for 50 MWe power plant in Sabalan, Iran. *Proc. World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 2501.
- Gorbach V.A. (2019). Purification of the used geothermal heater carrier from arsenic compounds. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 249, 5 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012037>
- Gould T.L. (1974). Vertical two-phase steam-water flow in geothermal wells. *Journal of Petroleum Technology*, 8, pp. 833–842. [https://doi.org/10.1016/0140-6891\(74\)90011-0](https://doi.org/10.1016/0140-6891(74)90011-0)
- Gudmundsdottir H., Jonsson M.T. (2015). The Wellbore simulator FloWell – model enhancement and verification. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 22071.
- Holmberg H., Acuña J., Næss E., Sønju O.K. (2016). Numerical model for nongrouted borehole heat exchanges, part 2 – Evaluation. *Geothermics*, 59, pp. 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.11.002>
- Horne R.N. (2015). Introduction to the World Geothermal Congress 2015. Technical Program. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia.
- Irsamukhtir R., Putra A.P., Novianto. (2015). Evaluation of James lip pressure method for low flow rate geothermal well: ML-5 case study. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 25023.
- Iry S., Rafee R. (2019) Transient numerical simulation of the coaxial borehole heat exchanger with the different diameters ratio. *Geothermics*, 77, pp. 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.09.009>
- James R. (1970). Factors controlling borehole performance. *Geothermics*, 2, pp. 1502–1515. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(70\)90470-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(70)90470-0)
- Kiryukhin A.V., Vorozheikina L.A., Voronin P.O., Kiryukhin P.A. (2017). Thermal and permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs in Kamchatka, Russia. *Geothermics*, 70, pp. 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.06.002>
- Koohi-Fayegh S., Rosen M.A. (2018). Long-term study of vertical ground heat exchangers with varying seasonal heat fluxes. *Geothermics*, 75, pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.03.010>

Lee K.C., Jenks D.G. (1989). Ohaaki geothermal steam transmission pipelines. *Proc. 11-th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, pp. 25–30.

Lu J., Ghassemi A. (2019). Coupled THMS Modeling of Fractured Reservoir Stimulation with Application to EGS Collab. *Proc. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, 13 p.

Lund J.W., Boyd T.L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, pp. 66–93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>

Lund J.W., Gawell K., Boyd T.L., Jennejohn D. (2010). The United State of America Country Update 2010. *Proc. World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia, 0102, 18 p.

Michalski A., Klitzsch N. (2019). First field application of temperature sensor modules for groundwater flow detection near borehole heat exchanger. *Geothermal Energy*, 7:37, 16 p. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0152-5>

Mubarak M.H., Zarrouk S.J. (2017). Discharge stimulation of geothermal wells: Overview and analysis. *Geothermics*, 70, pp. 17–37. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.05.012>

Newson J. (2015). Geothermal Conference Publications: what are we talking about? *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 00001.

Norbeck J.H., McClure M.W., Horne R.N. (2018). Field observations at the Fenton Hill enhanced geothermal system test site support mixed-mechanism stimulation. *Geothermics*, 74, pp. 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.03.003>

On M.D.G., Andrino R.P. (2015). Evaluation of hydraulic stimulation-induced permeability enhancement. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 22094.

Palachio A. (1990). Effect of heat transfer on the performance of geothermal wells. *Geothermics*, 19(4), pp. 311–328. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(90\)90035-A](https://doi.org/10.1016/0375-6505(90)90035-A)

Pashkevich R.I., Mamaev D.V. (2019). Thermo-hydrodynamic model of the Koshelev geothermal system, Kamchatka, Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 367(012013), 8 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/367/1/012013>

Pashkevich R.I., Muratov P.V. (2015). Film condensation in a large diameter tube with upward steam flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, pp. 804–810. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.001>

Pasikki R.G., Libert F., Yoshioka K., Leonard R. (2010). Well stimulation techniques applied at the Salak geothermal field. *Proc. World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 2274.

Potapov V.V., Fediuk R.S., Gorev D.S. (2020). Membrane concentration of hydrothermal SiO₂ nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, 251, 15 p. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117290>

Rizaldy, Zarrouk S.J. (2016). Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines. *Proc. 38th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, pp. 1–5.

Shulyupin A.N., Chernev I.I. (2015). Some methods for reducing of steam deficit at geothermal power plants exploitation: Experience of Kamchatka (Russia). *Geothermal Energy*, 3:23, 11 p. <https://doi.org/10.1186/s40517-015-0042-4>

Siratovich P., Cole J., Heap M., Villeneuve M., Reuschle T., Swanson K., Kennedy B., Gravley D., Lavallee Y. (2015a). Experimental thermal stimulation of the Rotokawa Andesite. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 22044.

Siratovich P.A., Villeneuve M.C., Cole J.W., Kennedy B.M., Bégué F. (2015b). Saturated heating and quenching of three crustal rocks and implications for thermal stimulation of permeability in geothermal reservoirs. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 80, pp. 265–280. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.023>

Tachimori M. (1982). A numerical simulation model for vertical flow in geothermal wells. *Proc. Stanford Workshop*. Stanford, 8, pp. 155–160.

Wigly D.M. (1989). Separation plant and pipework design – Ohaaki steam field. *Proc. 11-th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, pp. 19–24.

Xu T., Liang X., Feng B., Jiang Zh. (2019). Geologic Setting of the Potential EGS Site at the Gonghe Basin, China: Suitability for Research and Demonstration of Hot Dry Rock Geothermal Energy Development. *Proc. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford.

Ye Zh., Vachaparampil A., Zhou X., Ghassemi A., Kneafsey T. (2019). Failure Behavior of the Poorman Schist and Its Fractures from EGS Collab Stimulation Site. *Proc. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford.

Zhang J., Xie J., Liu X. (2019a). Numerical evaluation of heat extraction for EGS with tree-shaped wells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 134, pp. 296–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.171>

Zhang Y., Feng J., Wu X. (2019b). Analysis of HDR resources development potential in North China. *Proc. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford.

Zhao H.D., Lee K.C., Freeston D.H. (2000). Geothermal two-phase flow in horizontal pipes. *Proc. World Geothermal Congress*. Kyushu-Tohoku, pp. 3349–3353.

Сведения об авторах

Александр Николаевич Шулюпин – доктор тех. наук, врио директора, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН

Россия, 680000, Хабаровск, ул. Дзержинского, д. 54

Тел: +7 (4212) 32-79-27; e-mail: ans714@mail.ru

Наталья Николаевна Варламова – аспирант, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН

Россия, 680000, Хабаровск, ул. Дзержинского, д. 54

Статья поступила в редакцию 23.03.2020;

Принята к публикации 28.07.2020;

Опубликована 11.12.2020

IN ENGLISH

Current trends in the development of geothermal resources

A.N. Shulyupin, N.N. Varlamova*

Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

*Corresponding author: Alexander N. Shulyupin, e-mail: ans714@mail.ru

Abstract. Based on the analysis of publications in world publications, as well as a generalization of the experience of developing domestic geothermal fields, current trends in the development of geothermal resources are shown. The key trend is considered to be the transition from subsidized to commercial projects, which increases the relevance of research in areas that have a significant impact on the economic efficiency of resource development processes, primarily in the direction of geothermal technologies. In terms of subsidized projects that set research goals, the most relevant are works in the direction of EGS (Enhanced Geothermal

Systems). Moreover, there is a tendency towards the creation of international interdisciplinary collaborative research teams. It is noted that the current level of technology development allows producing geothermal energy for use in local heat supply systems practically anywhere in the world. However, given the concentration of power per unit area, the basis of modern geothermal energy is still the direction associated with the rise of deep fluids to the surface in areas characterized by the presence of ascending flows of hot juvenile fluids. It is indicated that Russia is lagging behind the world level of progress in the development of geothermal resources,

including in terms of current research and development directions, and measures are proposed to overcome this lag.

Keywords: geothermal energy, geothermal resources, hot rocks, underground fluids, geothermal field, heat energy water field, geothermal technology

Recommended citation: Shulyupin A.N., Varlamova N.N. (2020). Current trends in the development of geothermal resources. *Georesursy = Georesources*, 22(4), pp. 113–122. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>

Acknowledgments

The reported study was funded by RFBR, project number 19-15-50084.

References

- Aguiar A.C., Myers S.C. (2019). Microseismic Focal Mechanisms and Implications for Changes in Stress During the 2014 Newberry EGS Stimulation. *Proc. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford. <https://doi.org/10.1785/0120190011>
- Alimonti C., Berardi D., Bocchetti D., Soldo E. (2016). Coupling of energy conversion systems and wellbore heat exchanger in a depleted oil well. *Geothermal Energy*, 4(11), 17 p. <https://doi.org/10.1186/s40517-016-0053-9>
- Alishaev M.G. (2019). Assessment of the indicators of circulation system of production geothermal energy in the case of thin. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 1, pp. 140–158. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0002331019010047
- Alkhasov A.B., Alkhasova D.A. (2019). Comprehensive utilization of low-potential geothermal waters of Southern Russia for heat and water supply and solution of environmental problems. *Thermal engineering*, 5, pp. 82–88. DOI: 10.1134/S0040363619050011
- Banwell C.J. (1955). Physical investigations. *Geothermal steam for power in New Zealand*. New Zealand, 117, pp. 45–74.
- Basmanov O.L., Kiryukhin A.V., Maguskin M.A., Dvigalo V.N., Rutqvist J. (2016). Thermo-hydrogeomechanical modeling of vertical ground deformation during the operation of the Mutnovskii geothermal field. *Journal of Volcanology and Seismology*, 10(2), pp. 138–149. DOI: 10.1134/S0742046316020032
- Belova T.P. (2019). XRD-investigations of the mechanism of lithium sorption from the separated liquid of the Puzhetskaya geothermal power plant (Kamchatka) by modified zeolites. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 367, 4 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/367/1/012004>
- Bertani R. (2009). Geothermal energy: an overview on resources and potential. *Proc. Int. Conf. on national development of geothermal energy use*. Slovakia, 17 p.
- Bertani R. (2016). Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report. *Geothermics*, 60, pp. 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003>
- Cheik H.S., Ali H.A. (2015). Prefeasibility design of single flash in Asal geothermal power plant 2x25 MW, Djibouti. *Proc. World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 25030.
- Chen Y., Huang L., EGS Collab Team. (2019). Optimal design of 3D borehole seismic arrays for microearthquake monitoring in anisotropic media during stimulations in the EGS collab project. *Geothermics*, 79, pp. 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.01.009>
- Dyadkin Ju.D. (1989). Development of steam-water field. Moscow: Nedra, 229 p. (In Russ.)
- Garcia-Gutierrez A., Martinez-Estrella J.I., Ovando-Castelar R., Vazquez-Sandoval A., Rosales-López C. (2015). Thermal Efficiency of the Los Humeros Geothermal Field Fluid Transportation Network. *Proc. World Geothermal Congress-2015*. Melbourne, Australia, 25007.
- Ghaderi I. (2010). Comprehensive comparison between transmission two-phase flow in one line and two line separately for 50 MWe power plant in Sabalan, Iran. *Proc. World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 2501.
- Gorbach V.A. (2014). Disposal of Exhausted Geothermal Solutions. *Georesursy = Georesources*, 3(58), pp. 44–48. (In Russ.)
- Gorbach V.A. (2019). Purification of the used geothermal heater carrier from arsenic compounds. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 249, 5 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012037>
- Gould T.L. (1974). Vertical two-phase steam-water flow in geothermal wells. *Journal of Petroleum Technology*, 8, pp. 833–842. <https://doi.org/10.2118/4961-PA>
- Gudmundsdottir H., Jonsson M.T. (2015). The Wellbore simulator FloWell – model enhancement and verification. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 22071.
- Holmberg H., Acuña J., Næss E., Sønju O.K. (2016). Numerical model for nongrouted borehole heat exchanges, part 2 – Evaluation. *Geothermics*, 59, pp. 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.11.002>
- Horne R.N. (2015). Introduction to the World Geothermal Congress 2015. Technical Program. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia.
- Iliukhin A.V., Mintsaev M.Sh., Isaeva M.R., and others. (2015). Process control system of a pilot industrial geothermal station with a circulation heat extraction scheme at the Khankalskoye field in the Chechen Republic. *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf.: Geoenergy*. Grozny: Alef, pp. 233–240. (In Russ.)
- Irsamukhti R., Putra A.P., Novianto. (2015). Evaluation of James lip pressure method for low flow rate geothermal well: ML-5 case study. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 25023.
- Iry S., Rafee R. (2019) Transient numerical simulation of the coaxial borehole heat exchanger with the different diameters ratio. *Geothermics*, 77, pp. 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.09.009>
- James R. (1970). Factors controlling borehole performance. *Geothermics*, 2, pp. 1502–1515. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(70\)90470-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(70)90470-0)
- Kiryukhin A.V., Fedotov S.A., Kiryukhin P.A. (2018). Magmatic systems and the conditions for hydrothermal circulation at depth in the Klyuchevskoi volcanic cluster as inferred from observations of local seismicity and thermo-hydrodynamic simulation. *Journal of Volcanology and Seismology*, 12(4), pp. 231–241. <https://doi.org/10.1134/S0742046318040036>
- Kiryukhin A.V., Vorozheikina L.A., Voronin P.O., Kiryukhin P.A. (2017). Thermal and permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs in Kamchatka, Russia. *Geothermics*, 70, pp. 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.06.002>
- Kolesnikov D.V., Lyubin A.A., Shulyupin A.N. (2015). Problems with using the geothermal resources of Kamchatka. *Power Technology and Engineering*, 49(3), pp. 212–215. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0601-7>
- Koohi-Fayegh S., Rosen M.A. (2018). Long-term study of vertical ground heat exchangers with varying seasonal heat fluxes. *Geothermics*, 75, pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.03.010>
- Lee K.C., Jenks D.G. (1989). Ohaaki geothermal steam transmission pipelines. *Proc. 11-th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, pp. 25–30.
- Lu J., Ghassemi A. (2019). Coupled THMS Modeling of Fractured Reservoir Stimulation with Application to EGS Collab. *Proc. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, 13 p.
- Lund J.W., Boyd T.L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, pp. 66–93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Lund J.W., Gawell K., Boyd T.L., Jennejohn D. (2010). The United State of America Country Update 2010. *Proc. World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia, 0102, 18 p.
- Michalski A., Klitzsch N. (2019). First field application of temperature sensor modules for groundwater flow detection near borehole heat exchanger. *Geothermal Energy*, 7:37, 16 p. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0152-5>
- Mubarok M.H., Zarrouk S.J. (2017). Discharge stimulation of geothermal wells: Overview and analysis. *Geothermics*, 70, pp. 17–37. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.05.012>
- Newson J. (2015). Geothermal Conference Publications: what are we talking about? *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 00001.
- Norbeck J.H., McClure M.W., Horne R.N. (2018). Field observations at the Fenton Hill enhanced geothermal system test site support mixed-mechanism stimulation. *Geothermics*, 74, pp. 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.03.003>
- On M.D.G., Andriano R.P. (2015). Evaluation of hydraulic stimulation-induced permeability enhancement. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 22094.
- Palachio A. (1990). Effect of heat transfer on the performance of geothermal wells. *Geothermics*, 19(4), pp. 311–328. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(90\)90035-A](https://doi.org/10.1016/0375-6505(90)90035-A)
- Pashkevich R.I., Mamaev D.V. (2019). Thermo-hydrodynamic model of the Koshchev geothermal system, Kamchatka, Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 367(012013), 8 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/367/1/012013>
- Pashkevich R.I., Mamaev D.V., Pavlov K.A. (2015). Thermohydrodynamic simulation of Avacha geothermal system considering thermometric survey data and landsat images. *Mining informational and analytical bulletin*, S63, pp. 63–78. (In Russ.)

- Pashkevich R.I., Muratov P.V. (2015). Film condensation in a large diameter tube with upward steam flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, pp. 804–810. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.001>
- Pasikki R.G., Libert F., Yoshioka K., Leonard R. (2010). Well stimulation techniques applied at the Salak geothermal field. *Proc. World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, 2274.
- Rules for the development of thermal energy water fields (2003). Transl. from Russ.: PB 07-599-03. *Pravila razrabotki mestorozhdeniy teploenergeticheskikh vod*. Moscow. (In Russ.)
- Popov G.V., Pashkevich R.I. (2018). Kinetics of ion exchange of lithium from solutions in static conditions. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal = Bashkir chemistry journal*, 25(4), pp. 46–49. DOI: 10.17122/bcj-2018-4-46-49
- Potapov V.V., Fediuk R.S., Gorev D.S. (2020). Membrane concentration of hydrothermal SiO₂ nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, 251, 15 p. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117290>
- Ramazanov M.M., Karakin A.V., Lobkovskiy L.I. (2019). Mathematical model of solutions movement with regard to the osmotic effect. *Doklady Akademii nauk*, 489(1), pp. 75–79. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0869-5652489175-79
- Rizaldy, Zarrouk S.J. (2016). Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines. *Proc. 38th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, pp. 1–5.
- Shulyupin A.N. (2011). The problems of hydraulics of the steam-water mixture in the development of steam-water fields. Vladivostok: Dal'nauka, 262 p. (In Russ.)
- Shulyupin A.N. (2019). Methods for ensuring of stable operate of steam-water wells. *Georesursy = Georesources*, 21(1), pp. 99–106. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.99-106>
- Shulyupin A.N., Chemev I.I. (2012). The problems and prospects of Kamchatka geothermal resource development. *Georesursy = Georesources*, 1(43), pp. 19–21. (In Russ.)
- Shulyupin A.N., Chernev I.I. (2015). Some methods for reducing of steam deficit at geothermal power plants exploitation: Experience of Kamchatka (Russia). *Geothermal Energy*, 3:23, 11 p. <https://doi.org/10.1186/s40517-015-0042-4>
- Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A. (2017). The Collection of Mathematical Models of Well-4 for the Calculation of Flows in Steam-Water Geothermal Wells. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 9(1), pp. 127–132. <https://doi.org/10.1134/S2070048217010136>
- Siratovich P., Cole J., Heap M., Villeneuve M., Reuschle T., Swanson K., Kennedy B., Gravley D., Lavallee Y. (2015a). Experimental thermal stimulation of the Rotokawa Andesite. *Proc. World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 22044.
- Siratovich P.A., Villeneuve M.C., Cole J.W., Kennedy B.M., Bégué F. (2015b). Saturated heating and quenching of three crustal rocks and implications for thermal stimulation of permeability in geothermal reservoirs. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 80, pp. 265–280. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.023>
- Tachimori M. (1982). A numerical simulation model for vertical flow in geothermal wells. *Proc. Stanford Workshop*. Stanford, 8, pp. 155–160.
- Vasyanovich Yu.A., Shulyupin A.N., Varlamova N.N. (2019). Estimation of limiting reservoir pressure for steam-lift production of fluid at Mutnovsky geothermal field. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, S30, pp. 25–32. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-8-30-25-32
- Veselko A.Yu. (2018). Conceptual model of the impact of geothermal field exploitation on the environment. *Geologiya, Geografiya i Globalnaya Energiya = Geology, Geography and Global Energy*, 3, pp. 38–42. (In Russ.)
- Wigly D.M. (1989). Separation plant and pipework design – Ohaaki steam field. *Proc. 11-th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, pp. 19–24.
- Xu T., Liang X., Feng B., Jiang Zh. (2019). Geologic Setting of the Potential EGS Site at the Gonghe Basin, China: Suitability for Research and Demonstration of Hot Dry Rock Geothermal Energy Development. *Proc. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford.
- Ye Zh., Vachaparampil A., Zhou X., Ghassemi A., Kneafsey T. (2019). Failure Behavior of the Poorman Schist and Its Fractures from EGS Collab Stimulation Site. *Proc. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford.
- Zhang J., Xie J., Liu X. (2019a). Numerical evaluation of heat extraction for EGS with tree-shaped wells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 134, pp. 296–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.171>
- Zhang Y., Feng J., Wu X. (2019b). Analysis of HDR resources development potential in North China. *Proc. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford.
- Zhao H.D., Lee K.C., Freeston D.H. (2000). Geothermal two-phase flow in horizontal pipes. *Proc. World Geothermal Congress*. Kyushu-Tohoku, pp. 3349–3353.

About the Authors

Alexander N. Shulyupin – Dr. Sci. (Engineering), Interim Director, Khabarovsk Federal Research Center of the Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences
54, Dzerzhinskogo st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

Natalia N. Varlamova – post-graduate student, Khabarovsk Federal Research Center of the Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences
54, Dzerzhinskogo st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

*Manuscript received 23 March 2020;
Accepted 28 July 2020; Published 11 December 2020*