

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

на диссертацию Черкасова Сергея Владимировича «Методологические основы создания и эксплуатации природно-техногенных систем геотермальной энергетики», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

**Актуальность темы диссертации.** Геотермальные ресурсы представляют собой неисчерпаемый источник энергии. Основной проблемой их использования является локализация ресурсов на существенных глубинах, требующая транспортировки тепловой энергии на поверхность. Методология создания и эксплуатации систем такого транспорта обеспечивает оптимизацию природно-техногенных систем теплоотбора за счет учета геофизических, геологических, гидрохимических, и теплофизических характеристик природной подсистемы на предпроектной стадии работ по созданию объектов геотермальной энергетики. Использование эффекта остаточного дебита предоставляет возможности для управления эффективностью циркуляционной системы теплоотбора, а предложенный способ интерпретации беспилотной инфракрасной съемки позволяет осуществлять мониторинг эксплуатации месторождения теплоэнергетических вод. Тема работы находится в тренде развития мировой энергетики – использование возобновляемых источников энергии, а также соответствует приоритетному направлению Стратегии научно-технологического развития России: б) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии. Таким образом, результаты диссертационного исследования С.В. Черкасова весьма **актуальны** для развития геотермальной энергетики.

**Анализ содержания работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, выводов, списка литературы, включающего 149 наименований, и 9 приложений. Объем работы составляет 249 страниц, содержит 62 рисунка и 12 таблиц.

Во **Введении** дана оценка современного состояния исследований и разработок в сфере геотермальной энергетики. Поставлены задачи и цели исследований, выполненных автором диссертации.

В **1 главе** дан достаточно полный обзор исследований и способов использования тепла Земли как на мировом уровне, так и применительно к условиям России. Показано, что в настоящий момент возможности гидротермальных ресурсов используются менее чем на 0,1%, а состояние геотермальной энергетики в России отстает от мирового опыта в связи с доминированием других видов энергетики.

Во **2 главе** обсуждаются существующие способы классификации геотермальных ресурсов. Исходя из этого анализа, автором предлагается упрощенная классификация геотермальных ресурсов на основе возможностей их использования, содержащая только три основных класса.

В **3 главе** рассматриваются геоэкологические аспекты геотермальной энергетики. Проанализированы разнообразные риски. Сделан вывод о преимуществе гидротермальных систем перед петротермальными при современном уровне развития технологий бурения и теплоотбора в Российской Федерации.

**4 глава** отражает название диссертации. В ней приведены результаты разработки методологии создания геотермальных природно-техногенных систем, которая предлагается для практического использования. Представлена блок-схема, демонстрирующая стадийность и последовательность действий по созданию объектов гидротермальной энергетики. Всего выделено шесть таких стадий.

**5 глава** является наиболее содержательной и объемной (43 страницы, то есть одна треть от содержательной части диссертации). В ней описано применение разработанной методологии к обоснованию и созданию первой и единственной в Российской Федерации дублетной циркуляционной системы на территории Ханкальского месторождения. Работы выполнены в рамках "Комплексного проекта по созданию опытно-промышленной геотермальной станции на основе реализации циркуляционной схемы использования глубинного тепла Земли" при непосредственном участии автора. Вызывает уважение огромный объем выполненных работ, продемонстрировавших большое разнообразие подходов и профессионализм автора.

В **6 главе** приведены результаты испытаний и технические характеристики Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции. Обнаружен эффект остаточного дебита, заключающийся в продолжении циркуляции теплоносителя после выключения насосного оборудования. Это эффект хотя и упоминается в литературе, но практически не изучен. В связи с этим предложена программа исследований эффекта остаточного дебита циркуляционной системы. Отмечена возможность реализации бинарной схемы для производства электроэнергии на Ханкальской станции, что, с учетом программы изучения остаточного дебита, делает станцию настоящим научным полигоном для геотермальной (включая петротермальные технологии) энергетики.

В **7 главе** описан предложенный автором метод дистанционного мониторинга геотермальных природно-техногенных систем. Здесь же приведены результаты мониторинга территории Ханкальского месторождения, подтверждающие основные положения подхода. В основе метода лежит использование беспилотного летательного аппарата, оснащенного инфракрасной камерой.

В **Заключении и Выводах** подробно резюмируются результаты работы и даются предложения по развитию геотермальной энергетики в России.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Предложенная классификация геотермальных ресурсов по возможным способам их использования кажется чрезмерно упрощенной, но, в то же время, вполне обоснована современным уровнем развития технологий геотермальной энергетики. Систематизация геоэкологических рисков базируется на использовании широкого круга литературных данных и не вызывает сомнений. Вывод о предпочтительности развития в Российской Федерации гидротермальной, а не петротермальной энергетики, на данном этапе развития соответствует состоянию имеющихся в нашей стране кадровых и технологических ресурсов. Обоснованность методологии создания объектов геотермальной энергетики продемонстрирована при сооружении Ханкальской опытно-промышленной тепловой геотермальной станции, которая, безусловно, может стать, и, в какой-то мере, уже является полигоном для развития и тестирования технологий теплоотбора и дальнейшего использования геотермальной энергии. Ясность теоретического обоснования эффекта остаточного дебита циркуляционной системы теплоотбора не вызывает сомнения в корректном определении

принципиального механизма эффекта, хотя сам эффект требует дальнейшего исследования. Предложенный способ интерпретации инфракрасных аномалий по их морфологическим характеристикам убедительно подтвержден наземной проверкой результатов интерпретации. Выводы и рекомендации по результатам исследования обоснованы всем содержанием работы.

**Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Достоверность результатов не вызывает сомнений, поскольку большая их часть проверена на практике при создании и эксплуатации Ханкальской опытно-промышленной станции. Предложенная автором классификация геотермальных ресурсов является новой в части определения температурных границ классов по возможным технологиям практического использования ресурсов.

Рассмотренные автором геоэкологические риски геотермальной энергетики достаточно широко известны, однако их сравнительный анализ по вероятности негативных явлений ранее не проводился.

Предложенная С.В. Черкасовым методология создания объектов геотермальной энергетики включает в себя комплекс задач вместе с методами их решения для разных стадий создания и эксплуатации природно-техногенных систем теплоотбора на основе логических связей между геологическими, гидрогоехимическими и теплофизическими параметрами природной подсистемы с одной стороны, и техническими характеристиками техногенной подсистемы – с другой. При этом отдельные связи сами по себе являются известными, однако их системное использование в методологии формирует новое качество как предпроектных исследований, так и дальнейших работ по использованию геотермальных ресурсов. Реализация методологии при проектировании Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции во многом определила успех создания первой в России дублетной циркуляционной системы теплоотбора.

Эффект остаточного дебита циркуляционной системы теплоотбора упоминается в литературе, однако его теоретическое обоснование выполнено автором впервые.

Способ интерпретации аномалий инфракрасной беспилотной съемки на основе корреляции формы аномалий с мелкими формами рельефа не был известен ранее.

**Значимость результатов, полученных автором для науки и практики.** Исследования С.В. Черкасова охватывают практически весь круг проблем, связанных с созданием геотермальных природно-техногенных систем, и во многом диссертационная работа представляет собой взвешенный гармоничный подход к использованию геотермальных ресурсов, как с теоретической (классификация ресурсов, систематизация геоэкологических рисков, обоснование эффекта остаточного дебита циркуляционной системы), так и с практической (разработка методологии, программы исследований эффекта остаточного дебита, способа интерпретации тепловой съемки) точки зрения. Рекомендации по практическому использованию результатов по большей части реализованы при создании Ханкальской станции. Эффект остаточного дебита требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

## **Замечания.**

1. В обзоре следовало бы упомянуть несколько известных монографий, в которых приведен детальный анализ всех аспектов развития геотермальной энергетики. Среди них: (1) DiPippo R. Geothermal power plants. Principles, Applications and Case Studies. 2005, Elsevier, Oxford, England. 450 p. (2) William E. Glassley. Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment, Second Edition. 2015 by Taylor & Francis Group, CRC Press. 410 p.
2. На стр. 7 автор пишет: «Многие исследователи относят к геотермальной энергетике технологии тепловых насосов, но эти технологии относятся, скорее, к энергосберегающим». То же на стр. 42. В связи с этим тепловые насосы в диссертации не рассматриваются. Все же следует сказать, что только с помощью тепловых насосов производится теплоснабжение жилых домов и производственных зданий от геотермальных источников низкого потенциала (менее 50°C). С этой точки зрения применение тепловых насосов для эксплуатации геотермальных источников относится к сфере энергетики.
3. На стр. 45: «Автором предлагается упрощенная генерализованная классификация геотермальных ресурсов на основе технологий их использования, содержащая три основных класса». Вполне можно согласиться. Но есть три комментария. Во-первых, можно добавить тепловые насосы для низких температур (см. замечание 2). Во-вторых, надо более подробно написать пункты в первом столбце, (например, «бинарные технологии», это тоже «производство электроэнергии»). В-третьих, диапазоны температур надо указать с пересечением границ интервалов. Например, бинарные технологии применимы и для температуры 80°C, а не только 95°C.
4. Стр. 119: «Станция построена в 2015 г. в рамках «Комплексного проекта по созданию опытно-промышленной геотермальной станции на основе реализации циркуляционной схемы использования глубинного тепла Земли». Это очень большое достижение. Но не указано, в каком режиме работает станция, сколько часов непрерывной работы, какова эффективность (в разных показателях).
5. Стр. 129. В качестве положительного эффекта остаточного дебита отмечено, что «Результат моделирования показывает (рис. 43), что если при принудительном дебите ГЦС через 15 лет эксплуатации температура флюида в зоне забоя продуктивной скважины понижается на 15°C, то при использовании эффекта остаточного дебита незначительное снижение температуры начинает наблюдаться только через 30 лет эксплуатации».  
Все же, что дает использование остаточного дебита для экономики, например? И как правильно использовать этот эффект?
6. Стр. 138. Описан и рекомендуется для исследований беспилотный летательный аппарат (БПЛА) конкретного типа. Есть ли у него двигатель? И какой вообще лучше использовать БПЛА?

**Заключение.** Приведенные выше замечания не меняют общей положительной оценки диссертационной работы, которая является законченным научным исследованием, представляющим крупный вклад в создание научных основ геотермальной энергетики. Полученные автором результаты обладают новизной и достоверны. Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие

выводы. Основные положения диссертации достаточно полно отражены в публикациях автора в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Черкасова Сергея Владимировича на тему «Методологические основы создания и эксплуатации природно-техногенных систем геотермальной энергетики» соответствует требованиям, предъявляемым пп. 9 – 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Главный научный сотрудник  
Института теплофизики СО РАН,  
академик РАН,  
д.ф.-м.н.

Алексеенко Сергей Владимирович

Дата: 11 мая 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской  
академии наук» (ФГБУН ИТ СО РАН)  
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.  
Тел. +7 383 330 30 50, E-mail: [aleks@itp.nsc.ru](mailto:aleks@itp.nsc.ru)

Подпись Алексеенко С.В. удостоверяю

Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.

Макаров Максим Сергеевич



Я, Алексеенко Сергей Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

11 мая 2021 г.