

УДК 556.3.06 (571.66)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-131-143

СТРАТЕГИЯ РАБОТ И МИНИМИЗАЦИЯ РИСКОВ ПРИ ПОИСКЕ И РАЗВЕДКЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ МУТНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРОГИДРОТЕРМ)

**Борис Владимирович Георгиевский¹, Ярослав Олегович Симаков²,
Азат Тахирович Хамитов³, Олег Сергеевич Анисимович⁴,
Алина Артемьевна Ахметгараева⁵, Ксения Александровна Ситар⁶✉,
Екатерина Ивановна Барановская⁷**

¹ ООО «ЗН НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР», Москва, Россия; bvgeo@mail.ru

² ООО «ЗН НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР», Москва, Россия; YSimakov@nestro.ru

³ АО «Зарубежнефть», Москва, Россия; AKhamitov@nestro.ru

⁴ ООО «ЗН НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР», Москва, Россия; OAnisimovich@nestro.ru

⁵ АО «ВНИИнефть — Западная Сибирь», Москва, Россия; AAkhmetgaraeva@nestro.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sitarka@my.msu.ru ✉

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; baranovskaya_kat@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена актуальной и активно развивающейся в настоящее время во всем мире тематике: поиску и разведке геотермальных месторождений. Последовательно продемонстрированы существующие тенденции развития геотермальной энергетики, которые наглядно демонстрируются суммарной величиной вырабатываемой энергии за счет геотермального тепла, сферами практического применения и инвестициями в геотермальную энергетику в мире. Дана краткая характеристика развития и освоения геотермальных месторождений в России, в том числе по основным регионам с повышенным геотермальным потенциалом, с учетом специфики их геологического строения. На примере Мутновского блока на Камчатке, как региона с наибольшими в настоящее время мощностями по выработке электроэнергии за счет геотермального тепла, проанализирована специфика планирования поисково-разведочных работ. Проанализированы геологические риски и продемонстрирована специфика построения геологических моделей геотермальных месторождений, позволяющих минимизировать риски и, тем самым, выработать наиболее эффективную стратегию поиска и разведки геотермальных месторождений применительно к условиям Камчатки. Показано, что ключевой особенностью при анализе геотермальных месторождений является междисциплинарный подход, учитывающий одновременно геолого-геофизические, гидрогеологическое и тектонические особенности данных объектов.

Ключевые слова: геотермальная энергетика, геологическое строение Камчатки, геологические риски, комплексирование геологических данных

Для цитирования: Георгиевский Б.В., Симаков Я.О., Хамитов А.Т., Анисимович О.С., Ахметгараева А.А., Ситар К.А., Барановская Е.И. Стратегия работ и минимизация рисков при поиске и разведке геотермальных месторождений (на примере Мутновского месторождения парогидротерм) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 131–143.

WORK STRATEGY AND RISK MINIMIZATION IN GEOTHERMAL PROSPECTING AND EXPLORATION (USING THE EXAMPLE OF THE MUTNOVSKY HYDROTHERMAL FIELD)

**Boris V. Georgievskiy¹, Yaroslav O. Simakov², Azat T. Khamitov³,
Oleg S. Anisimovich⁴, Alina A. Akhmetgaraeva⁵, Ksenia A. Sitar⁶✉,
Ekaterina I. Baranovskaya⁷**

¹ “ZN SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTRE” LLC, Moscow, Russia; bvgeo@mail.ru

² “ZN SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTRE” LLC, Moscow, Russia; YSimakov@nestro.ru

³ Zarubezhneft JSC, Moscow, Russia; AKhamitov@nestro.ru

⁴ “ZN SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTRE” LLC, Moscow, Russia; OAnisimovich@nestro.ru

⁵ VNIIneft — West Siberia JSC, Moscow, Russia; AAkhmetgaraeva@nestro.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sitarka@my.msu.ru ✉

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; baranovskaya_kat@mail.ru

Abstract. The article addresses a topic that is currently both highly relevant and rapidly developing worldwide: the exploration and prospecting of geothermal fields. It presents a comprehensive overview of current geothermal energy trends, illustrating the total energy generated by geothermal heat, the areas of practical application, and global geothermal energy investment. It also provides a brief overview of the development of geothermal fields in Russia, including the key regions with high geothermal potential, taking into account their geological structure. Using the Mutnovsky Block in

Kamchatka as an example, the region currently boasting the largest geothermal power generation capacity, it analyzes the specifics of exploration planning. It also examines geological risks and demonstrates the specifics of constructing geological models of geothermal fields, which can minimize these risks and, thus, develop the most effective exploration strategy for Kamchatka. It is shown that the key feature in the analysis of geothermal fields is an interdisciplinary approach that simultaneously takes into account the geological, geophysical, hydrogeological and tectonic features of these objects.

Keywords: geothermal energy, geological structure of Kamchatka, geological risks, integration of geological data

For citation: Georgievskiy B.V., Simakov Ya.O., Khamitov A.T., Anisimovich O.S., Akhmetgaraeva A.A., Sitar K.A., Baranovskaya E.I. Work Strategy and Risk Minimization in Geothermal Prospecting and Exploration (Using the Example of the Mutnovsky Hydrothermal Field). *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 131–143. (In Russ.).

Введение. Геотермальная энергия, использующая тепло земных недр, занимает уникальное место в структуре мировых энергоресурсов. Ее важность стремительно растет в контексте глобальных трендов по обеспечению энергонезависимости удаленных регионов и стремлению к декарбонизации. Среди возобновляемых источников энергии, по сравнению с солнечной и ветровой генерацией, геотермальные источники обеспечивают более стабильную и прогнозируемую подачу энергии, что делает их надежным источником для теплоснабжения городов и промышленности.

В научной литературе последнего десятилетия наблюдается значительное усиление интереса к геотермальной энергетике, что отражает ее растущую роль в глобальной энергетической системе. В последнее время опубликованы многочисленные обзоры по всемирному развитию и электрогенерации на основе геотермального тепла [Бадавов, 2020; Nuttrier, 2020] и по прямому использованию геотермального тепла [Бадавов, 2020; Lund, Toth, 2020] в мире, а также развернутые аналитические обзоры по развитию геотермальной энергетике в России [Свалова, 2022; Спектор и др., 2024]. Фундаментальные и прикладные задачи, связанные с геотермальной энергетикой, охватывают широкий спектр разделов геологии и геофизики, что отражает междисциплинарный характер этой отрасли, и все больше проявляется тенденция смещения фокуса с простого описания ресурсов на комплексное моделирование и прогнозирование.

Динамика использования геотермального тепла в мире весьма неравномерна и существенным образом зависит от геологических условий [Георгиевский и др., 2025]. В Европе лидером является Исландия, где геотермальное отопление покрывает потребности около 90% домохозяйств. В континентальной Европе активно развивается сектор геотермального теплоснабжения в таких странах, как Италия, Франция, Германия и Венгрия, где тепло земных недр используется для обогрева целых районов и теплиц. Турция, которую часто относят к европейскому рынку, демонстрирует один из самых высоких в мире темпов роста для генерации электроэнергии. В странах Азии наблюдается самый большой рост. Китай является мировым лидером по прямому использованию геотермального тепла (например, для отопления), Индонезия и Филиппины входят в топ-5 стран по установленной мощности

геотермальных электростанций, постоянно наращивая ее. В Северной Америке лидером по установленной мощности геотермальных электростанций являются США, демонстрируя при этом умеренные темпы роста из-за высокой конкуренции с другими источниками энергии. В странах Африки Кения является ярким примером, где геотермальная энергия стала ключевым звеном национальной энергетике, обеспечивая около половины всей вырабатываемой в стране электроэнергии и продолжая активно развиваться.

Однако несмотря на обширную географию использования и высокий уровень технологического развития в вопросах освоения геотермальных месторождений существенной и не полностью решенной проблемой остается методика освоения на начальных этапах, на стадии поиска и разведки месторождений. Применение методов, подразумевающих комплексирование данных и одновременный учет геологических, геофизических, теплофизических, гидродинамических особенностей объекта, требует выработку концептуально корректного подхода, который, с одной стороны, должен минимизировать геологические риски, а с другой — помочь достичь экономически эффективной схемы разведки и последующего освоения геотермального месторождения.

Разведка геотермальных месторождений и использование геотермального тепла в мире. За последние два десятилетия мировое потребление геотермальной энергии (как для производства электроэнергии, так и для прямого использования тепла) выросло более чем в два раза. По данным международных агентств, среднегодовые темпы прироста мощностей составляют около 3–5%. Использование тепла традиционно делится на два ключевых направления: прямое использование тепла и генерация электричества (рис. 1).

Самым широко распространенным является прямое применение геотермальной энергии, при котором низко- и среднетемпературные ресурсы (до 150 °С) напрямую, без сложных преобразований, используются для различных целей. При этом, по разным оценкам [The Future..., 2024], для наиболее технически достижимых глубин до 3–5 км суммарный геотермальный потенциал оценивается в 42 ТВт, при этом суммарное использование геотермального тепла для целей электрогенерации и по прямому использованию составляет около 0,4% (рис. 2).

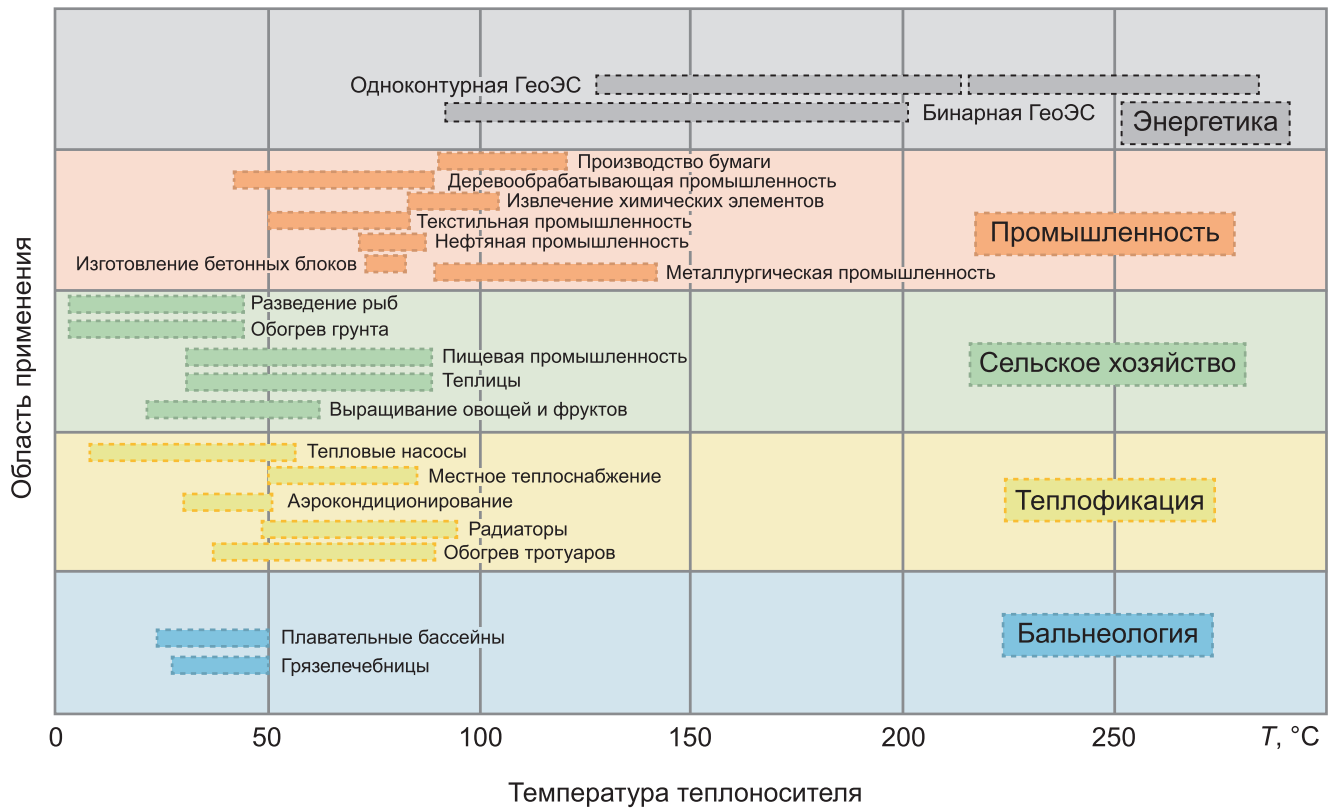


Рис. 1. Использование геотермального тепла в мире [Еремин и др., 2024]

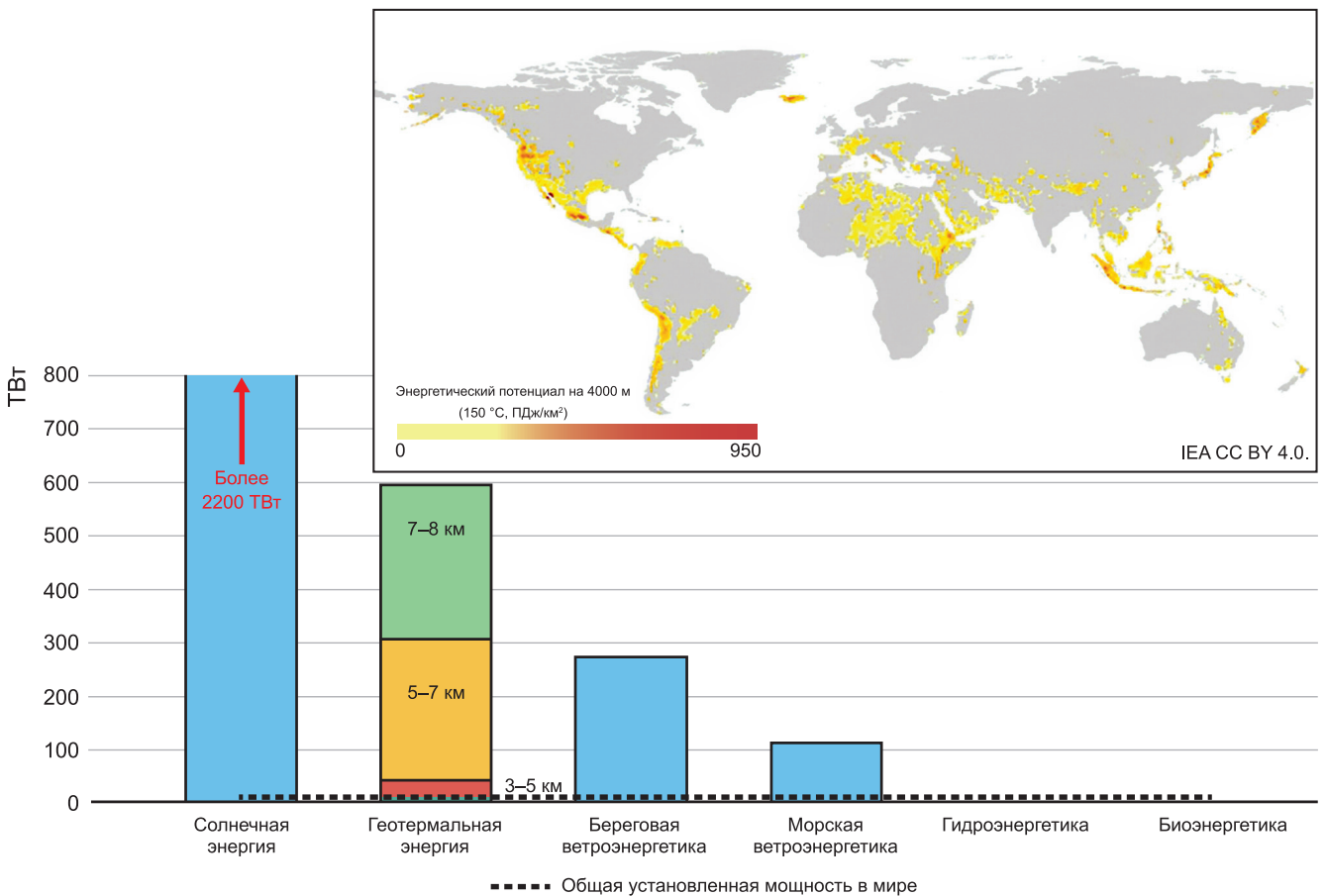


Рис. 2. Оценка величины геотермального потенциала для различных глубин и сравнение его величины с иными источниками возобновляемой энергии, по [The Future ..., 2024]

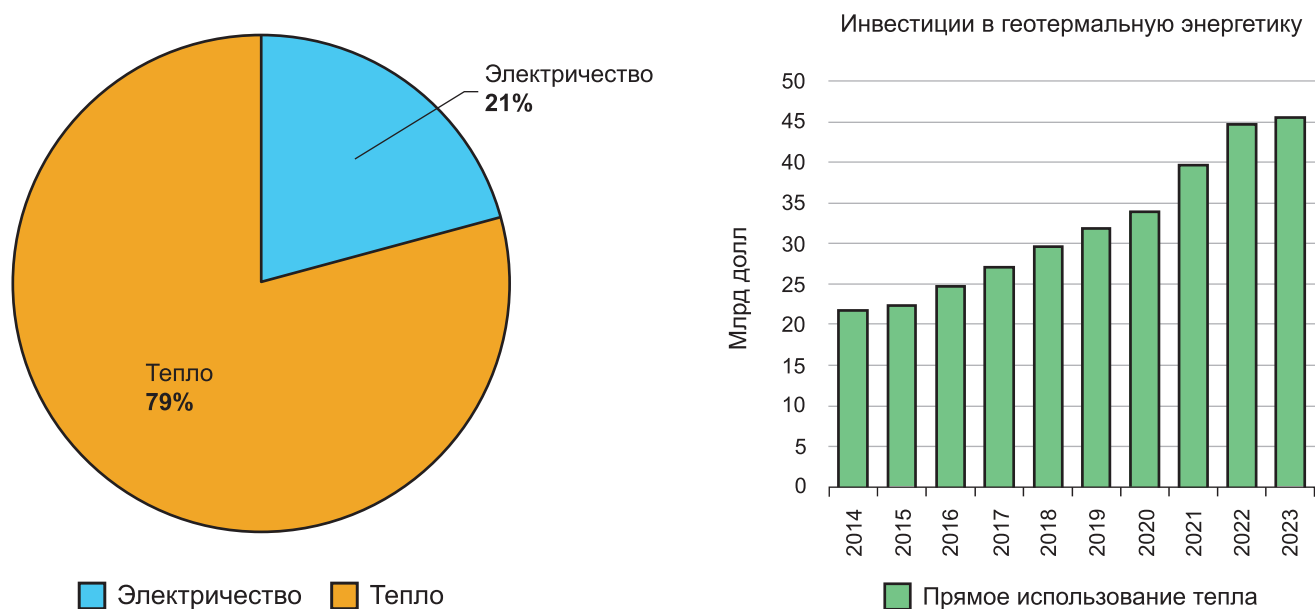


Рис. 3. Слева: использование геотермального тепла для выработки электроэнергии и прямого потребления. Справа: динамика роста суммарных инвестиций (в млрд долларов) в геотермальную энергетику, по [The Future..., 2024]

Термальные воды используются в бальнеологических и рекреационных целях, для оздоровления и туризма. Чрезвычайно широко используются в сельском хозяйстве для обогрева теплиц и круглогодичного выращивания культур, обогрева грунта, в рыбных хозяйствах. Важнейшей сферой применения является теплофикация — централизованное снабжение теплом жилых, коммерческих и промышленных зданий для их отопления и горячего водоснабжения, в этом секторе прямое использование геотермальной энергии демонстрирует высочайшую эффективность. В отличие от геотермальных электростанций, требующих высокотемпературных источников (свыше 150°C), для теплофикации пригодны ресурсы средних ($90\text{--}150^{\circ}\text{C}$) и, что особенно важно, низких температур ($30\text{--}90^{\circ}\text{C}$). Это значительно расширяет географию возможного применения. В случаях, когда температура геотермальной воды недостаточно высока для современных систем отопления (например, ниже 70°C), используются тепловые насосы, которые обеспечивают повышение температуры до необходимого уровня, значительно повышая эффективность системы.

Актуальность работ по освоению геотермальных месторождений. Совокупность таких факторов, как универсальность применения, расширение ресурсной базы за счет новых технологий и малоосвоенных территорий, наличие готовых технических решений, рекордный рост инвестиций и значимость для развития изолированных территорий, — однозначно свидетельствует о высокой и растущей актуальности геотермальной энергетики. Геотермальная энергия также обладает преимуществом двойного применения (рис. 3): в сфере электрогенерации установленная мощность геотермальных электростанций в мире превышает 16 ГВт и продолжает демонстрировать устойчивый рост, а установленная

тепловая мощность геотермальных систем в мире оценивается более чем в 140 ГВт [The Future..., 2024]. Она перестает быть нишевым источником и становится стратегическим компонентом глобальной устойчивой энергосистемы, предлагая стабильное и локализованное решение энергетических вызовов современности.

Традиционно развитие отрасли базировалось на освоении гидротермальных месторождений, которые были географически привязаны к тектонически активным зонам (например, «Огненное кольцо» Тихого океана). Качественный скачок связан с развитием технологий для освоения различных геотермальных месторождений: систем EGS для петротермальных месторождений (так называемых «усовершенствованных геотермальных систем»), использования бинарных циклов и тепловых насосов для низко- и среднетемпературных вод, а также проектов сверхглубокого бурения.

При этом инвестиционная активность, которая является прямым индикатором актуальности любого энергетического сектора, за последнее десятилетиекратно возросла, как в отдельных странах, так и по всему миру в целом (рис. 3). Таким образом освоение геотермальных месторождений играет ключевую роль в социально-экономическом развитии регионов, тесно связано с развитием технологических решений глубинного и поверхностного обустройства, и имеет свою значимость как пример одного из направлений развития экологически чистой энергетики.

Специфика изучения гидротермальных систем. Исследование геотермальных месторождений кардинально отличается от разведки традиционных углеводородов именно необходимостью одновременного анализа как минимум трех взаимосвязанных систем: гидрологической, геологической

и тектонической. В случае петротермальных систем акценты смещаются, но комплексность остается ключевым принципом.

Ключевым объектом традиционной геотермальной энергетики являются именно гидротермальные системы. Их изучение начинается с понимания того, что это, прежде всего, гидрогеологический объект. Моделируются гидродинамические параметры: зона питания, разгрузки, движение воды в пласте, с соответствующей оценкой продуктивности месторождения, обоснованием и расчетом необходимой реинъекции. При этом химический состав флюида, его минерализация и фазовый состав определяют риски коррозии и отложения вторичных минералов, что напрямую влияет на срок службы скважин и экономику проекта. Второй неотъемлемой составляющей является стратиграфическая и петролого-минералогическая характеристика комплексов пород-резервуаров. Определяющими факторами являются как фильтрационно-емкостные свойства, так и текстурные особенности (трещиноватость, сланцеватость, отдельность). Третья системообразующая составляющая — тектонический режим, который для гидротермальных месторождений определяет температурный фактор. Разломы и зоны трещиноватости, возникающие в результате тектонических процессов, служат основными каналами для подъема глубинного тепла и циркуляции флюидов. Без понимания тектонической структуры района невозможно объяснить аномальный тепловой поток и локализацию самого месторождения. Чаще всего именно пересечения разломов становятся наиболее перспективными целями для бурения. Если вод насыщенная порода-коллектор отсутствует, но тепловой потенциал высок, фокус смещается на изучение петротермальных систем, и в этом случае объектом исследования становится массив горячих, но сухих и плотных горных пород. Ключевыми параметрами являются их температурный режим, тепловые и механические свойства. Поскольку в таких массивах нет естественного теплоносителя (воды) и проницаемости, ключевая задача технологий состоит в создании искусственного подземного теплообменника с помощью гидроразрыва пластов либо циркуляции теплоносителя по замкнутому контуру через нагнетательные скважины.

Таким образом, специфика исследования заключается в синтезе данных из разных дисциплин. Геотермальная скважина бурится не просто в точку с аномальной температурой, а в место, где совпадают несколько критических условий: наличие проницаемого коллектора (геология), циркулирующего в нем флюида (гидрогеология) и источника тепла, связанного с тектонически активными зонами (тектоника). Неучет любого из этих факторов ведет к бурению «сухих» или малодебитных скважин, что и составляет главный финансовый риск при освоении геотермальной энергии. Для выработки эффективной стратегии поисково-разведочных работ требуется

подход, основанный на комплексировании данных, позволяющий минимизировать геологические риски при разведке гидротермальных месторождений.

Актуальность гидротермальной энергетики для России. Гидротермальная энергетика, использующая тепло подземных термальных вод, обладает значительной актуальностью для России, несмотря на ее скромную долю в общем энергобалансе. Ее значение определяется не столько объемами генерации, сколько решением критически важных задач в специфических регионах страны. Ключевое значение заключается в обеспечении энергетической независимости удаленных и изолированных территорий. Для таких регионов, как Камчатка, Курильские острова, некоторые района Предкавказья зависимость от завозного топлива означает чрезвычайно высокую стоимость электро- и теплоснабжения, а также риски перебоев в сложных климатических условиях.

В России термальные воды сосредоточены в пяти основных геотермальных регионах: Курило-Камчатском, Охотско-Чукотском, Байкальском, Западно-Сибирском и Крымско-Кавказском. Согласно государственному балансу [Спектор и др., 2024], на учете состоят 43 месторождения, пригодные для теплоснабжения, и 5 — для геотермальной энергетики. Камчатка и Курилы, как единственные в России регионы с современным вулканизмом, отличаются наличием высокотемпературных гидротермальных систем. Именно здесь расположены крупнейшие месторождения, такие как Паратунское, Верхне-Паратунское и Эссовское, с запасами свыше 20 тыс. м³/сутки каждое. Налычевское месторождение имеет запасы 15 тыс. м³/сутки ($T \approx 75^\circ\text{C}$), в то время как остальные 16 месторождений значительно мельче (0,2–3,5 тыс. м³/сутки).

В составе *Курило-Камчатского геотермального региона* на государственном балансе числятся пять месторождений парогидротерм: три расположены на полуострове Камчатка и два — на Курильских островах. На Камчатке к эксплуатируемым объектам относятся Паужетское и Мутновское месторождения, на базе которых функционируют геотермальные электростанции (ГеоЭС). Также выделяется Больше-Банное месторождение, запасы парогидротерм которого отнесены к забалансовым, в связи с чем оно не разрабатывается. Еще одним перспективным объектом является Нижне-Кошелевское месторождение, чьи параметры и энергетический потенциал сопоставимы с Мутновским. Однако его запасы не были утверждены по причине незавершенных разведочных работ. Паужетское месторождение служит ресурсной базой для Паужетской ГеоЭС с запасами пароводяной смеси (ПВС) 36,7 тыс. т/сут. Существует мнение, что прогнозные ресурсы месторождения близки к исчерпанию, поскольку бурение новых скважин не приводит к значительному приросту добычи. Мутновское месторождение эксплуатируется с 1999 г. и обеспечивает теплоносителем Верхне-Мутновскую (12 МВт) и Мутновскую

(50 МВт) ГеоЭС. Вырабатываемая электроэнергия покрывает до 30% потребностей Петропавловск-Камчатской агломерации. Энергетический потенциал месторождения оценивается как высокий и может быть увеличен за счет освоения его южной части и внедрения бинарных технологий. Больше-Банное месторождение, первоначально рассматривавшееся как аналог Паужетского, в ходе разведки было признано нерентабельным для строительства ГеоЭС из-за недостаточных запасов.

На Курильских островах разведаны и частично освоены два месторождения парогидротерм, используемые для геотермальной энергетики: на островах Кунашир и Итуруп. Освоение месторождения Горячий Пляж (о. Кунашир) достигло глубины 1270 м. На его базе функционирует Нижне-Менделеевская ГеоЭС, обеспечивающая электроснабжение поселков Южно-Курильск и Горячий Пляж. Согласно геофизическим и гидрогеотермическим данным, ресурсы месторождения значительно превосходят как текущие объемы добычи, так и утвержденные запасы. Перспективы увеличения добычи связаны с бурением на глубины свыше 1500 м и освоением перспективных площадей, прилегающих к Нижне-Менделеевскому участку. На Океанском месторождении (о. Итуруп) была введена в опытную эксплуатацию Океанская ГеоЭС мощностью 2,5 МВт, снабжавшая электроэнергией г. Курильск и другие населенные пункты острова. Однако в 2015 г. станция была выведена из эксплуатации вследствие аварии энергетической установки, восстановление которой признано невозможным.

Термальные воды *Охотско-Чукотского региона* генетически связаны с одноименным вулканическим поясом, который протягивается более чем на 3000 км вдоль тихоокеанского побережья. Интенсивный магматизм и наземный вулканизм, продолжавшиеся здесь до позднего кайнозоя, обусловили формирование многочисленных проявлений термальных вод на всём протяжении пояса — от Чукотки до Сихотэ-Алиня. На территории Чукотки и Охотского сектора выявлено свыше 20 групп термальных источников. Их локализация контролируется зонами тектонических нарушений в мезо-кайнозойских вулканогенных толщах. К числу наиболее значимых термопроявлений Чукотского сектора относятся Чаплинские, Лоринские, Мечигменские, Сенявинские, Аракамченские и Дежневские источники. Их средние температуры варьируются от 30–40 °С до 80 °С при различной минерализации. Наибольшая минерализация (18–19 г/л) зафиксирована в Чаплинских и Дежневских источниках, а максимальная температура (97 °С) — в Мечегменских. Наиболее известным и высокотемпературным проявлением Охотского сектора является Тальский источник с температурой свыше 90 °С. Дебит пробуренной на месторождении скважины достигает 10 л/с. В Сихотэ-Алиньском секторе распространены слаботермальные источники с температурами от 20 °С до 54 °С.

Формирование термальных вод *Байкальского региона* обусловлено его приуроченностью к Байкальской рифтовой зоне протяженностью около 2000 км. Для этой зоны характерны высокая сейсмичность и проявления четвертичного вулканизма. Термальные источники распространены по всей длине рифта и приурочены к зонам трещиноватости глубинных разломов в докембрийских гранитных массивах. Наибольшая концентрация термопроявлений наблюдается в центральной (осевой) части рифтовой долины, где отмечаются максимальные величины растяжения земной коры, выраженные крупными тектоническими впадинами (Тункинской, Байкальской, Баргузинской и др.). Циркуляция подземных вод имеет трещинно-жильный характер. Наиболее значимые по температуре (до 84 °С) и дебиту (от 1–10 до 85 л/с) источники связаны с Баргузинской впадиной и отличаются низкой минерализацией. Десятки известных термопроявлений традиционно используются в бальнеологических и рекреационных целях и учитываются государственным балансом как месторождения минеральных вод. При этом широкое практическое применение термальных вод региона ограничено рядом факторов: недостаточным дебитом для организации теплоснабжения, а зачастую и их удаленностью в труднодоступных районах от потенциальных потребителей.

Термальные воды *Западной Сибири* приурочены главным образом к нижнемеловым водоносным комплексам в пределах Западно-Сибирского артезианского бассейна. Наибольший потенциал сосредоточен в его центральных и южных районах. Воды обладают напорным характером, величина избыточного напора на устье скважин достигает десятков метров. Наблюдается закономерный рост температуры и минерализации вод с глубиной погружения водоносных горизонтов к центру бассейна. На глубинах более 2500 м пластовые температуры достигают около 100 °С, а на изливе — до 85 °С; эти воды, как правило, имеют соленый состав. В южной части бассейна воды, добываемые с глубин 1500–2300 м, характеризуются температурой на изливе 45–65 °С и минерализацией 20–30 г/л. С интервала 600–1500 м температуры на изливе составляют до 45 °С при минерализации от 2 до 20 г/л. В настоящее время термальные воды в Омской, Томской и Новосибирской областях используются в незначительных объемах для бальнеологии, рекреации и рыбоводства. Их применение для теплофикации практически отсутствует. К основным ограничивающим факторам относятся высокие капитальные затраты на бурение глубоких скважин и создание теплофикационных систем, рассчитанных на работу с высокоминерализованными водами, а также сложность утилизации отработанных термальных вод.

Формирование термальных вод *Крымско-Кавказского региона* контролируется преимущественно мезо-кайнозойскими отложениями Скифской плиты, а также зонами ее сочленения с альпийскими

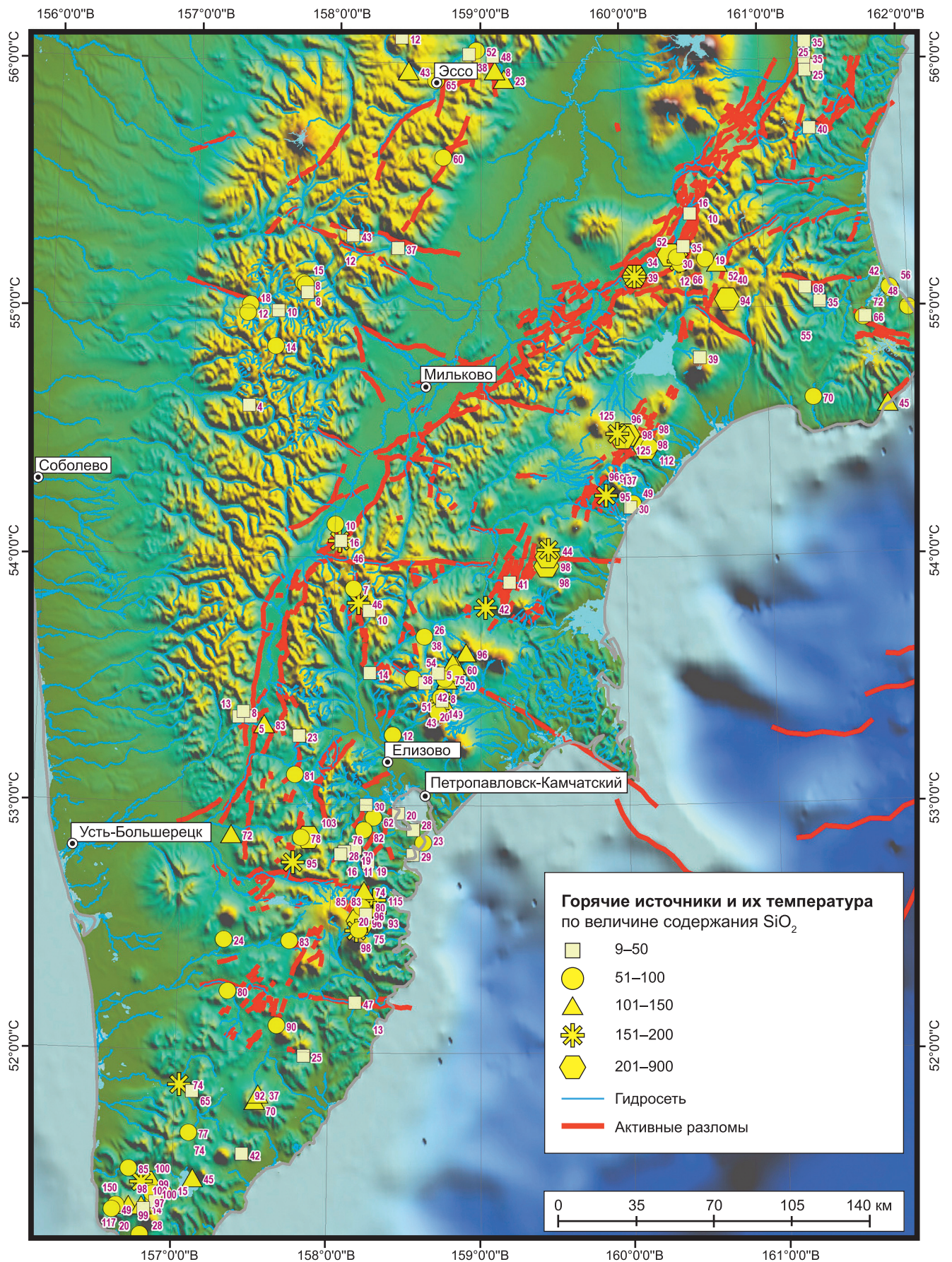


Рис. 4. Цифровая модель рельефа, активные разломы Камчатки и горячие источники, различающиеся по температуре выхода флюида на поверхность и содержанию SiO_2 , как геотермометру максимального прогрева [Георгиевский и др., 2025]

складчатыми сооружениями Крыма и Большого Кавказа. Для большей части региона характерно пластовое залегание термальных вод, образующих артезианские бассейны. Отдельные термопроявления связаны с зонами тектонических нарушений и трещиноватости на северном склоне Большого Кавказа. Температура термальных вод на изливе варьирует от 40 до 117 °С, а минерализация — в широком диапазоне. Наблюдается прямая зависимость: с увеличением глубины вскрытия водоносных горизонтов возрастают как температура, так и минерализация вод. В Краснодарском крае и Адыгее воды вскрываются на глубинах 1,7–3,0 км с температурами 60–117 °С, низкой минерализацией (менее 10 г/л) характеризуются лишь около 20% ресурсов; остальные 80% имеют минерализацию до 30 г/л и выше. В Дагестане распространены термальные воды с температурой 50–100 °С и минерализацией 2–27 г/л. В Чеченской Республике отличительной особенностью является низкая минерализация вод (как правило, не более 2,0 г/л) при температурах 60–108 °С. На государственном балансе региона Северного Кавказа числится 30 месторождений теплоэнергетических вод. Единственное в Крыму Новоселовское месторождение в настоящее время не эксплуатируется.

Геологическое строение гидротермальных месторождений в областях активного вулканизма (Мутновский блок, Камчатка). Камчатский край и Курильские острова — единственные регионы в России, где имеются высокотемпературные пароводяные смеси, а также многочисленные месторождения геотермальных вод. Самыми крупными в России являются месторождения в пределах Мутновского блока (Мутновское и Верхне-Мутновское). Камчатский район современного вулканизма охватывает большую площадь полуострова к югу от Камчатского перешейка. Здесь сосредоточены все известные действующие и потухшие вулканы Камчатки, линейно вытянутые в цепочки вдоль основных крупных разломов полуострова (рис. 3). Геология исследуемого района изучена достаточно хорошо [Шарапов и др., 1979]. Мутновский блок является элементом Южно-Камчатского антиклинория, где в наиболее приподнятых участках обнажаются отложения нижнего структурного яруса, представленные олигоцен-миоценовой андезитовой формацией (ахотенская толща и асачинская свита) и миоценовыми интрузивами диорит-гранодиоритового состава. В геологическом строении преобладают миоцен-плиоценовые осадочные и вулканические отложения. Размещение как современных, так и палеогидротермальных систем, а также характер развития вулканизма в центральных и южных районах Камчатки контролируются региональными и локальными разломами. Структурный анализ современных и палеогеологических процессов, связанных с вулканизмом и гидротермальной активностью, базируются на двух положениях:

– лавовые излияния происходят по проницаемым зонам растяжения («глубинным» разломам); участки с мощными толщами вулканитов — наиболее проницаемые и являются главными магмоконтролирующими структурами;

– гидротермальные системы приурочены к зонам трещиноватости крупных разломов, обеспечивающих их тепловое питание; часто эти разломы также контролируют и положение вулканов.

Гидрогеотермальные условия Восточно-Камчатского бассейна формируются под влиянием глубинных тепловых источников. Нагрев пород и подземных вод в зонах наиболее значительных термальных аномалий обусловлен, в первую очередь, поступлением тепла от остывающих магматических очагов и сопутствующих им парогазовых флюидов и имеет прямую связь с геохимическим составом подземных вод, в которых содержание SiO₂ может служить геотермометром (рис. 4, с учетом данных [Кирюхин и др., 2010]) зон с различной степенью прогрева подземных вод, циркулирующих по ослабленным зонам разломов и трещиноватости. Пространственное распределение и интенсивность этих аномалий определяются разломной тектоникой и удаленностью от действующих вулканов и приповерхностных магматических очагов.

В пределах Мутновского блока развитие гидротермальных систем и сопутствующей рудной минерализации демонстрирует четкую пространственно-временную связь с магматическими процессами. Основные зоны гидротермально измененных пород приурочены к крупным разломным структурам северо-восточного простирания, являющимся частью транскамчатской глубинной разломной системы. Формирование продуктивных гидротермальных систем происходило исключительно в участках развития интрузивных тел гранитоидов или экстррузивных массивов андезито-дацитового состава, которые выступали в качестве тепловых источников. Гидротермальные системы Мутновского блока демонстрируют четкую пространственно-временную связь с этапами магматической активности. Наиболее интенсивная гидротермальная деятельность проявлялась на определенных этапах эволюции кислого вулканизма, что отражает их генетическую взаимосвязь. Современные термальные источники рассматриваются как реликты более мощных четвертичных рудообразующих систем. Их параметры и структурные особенности могут служить моделями при реконструкции палеогидротермальных процессов.

Стратегия доразведки геотермальных месторождений: геологическая модель как инструмент для минимизации рисков. Мутновская гидротермальная система расположена в субмеридиональной депрессии к северу от вулкана Мутновская Сопка (рис. 5). Фундамент депрессии сложен вулканогенными комплексами (ахотенский, асачинский, алнейский) и четвертичными эффузивами, которые

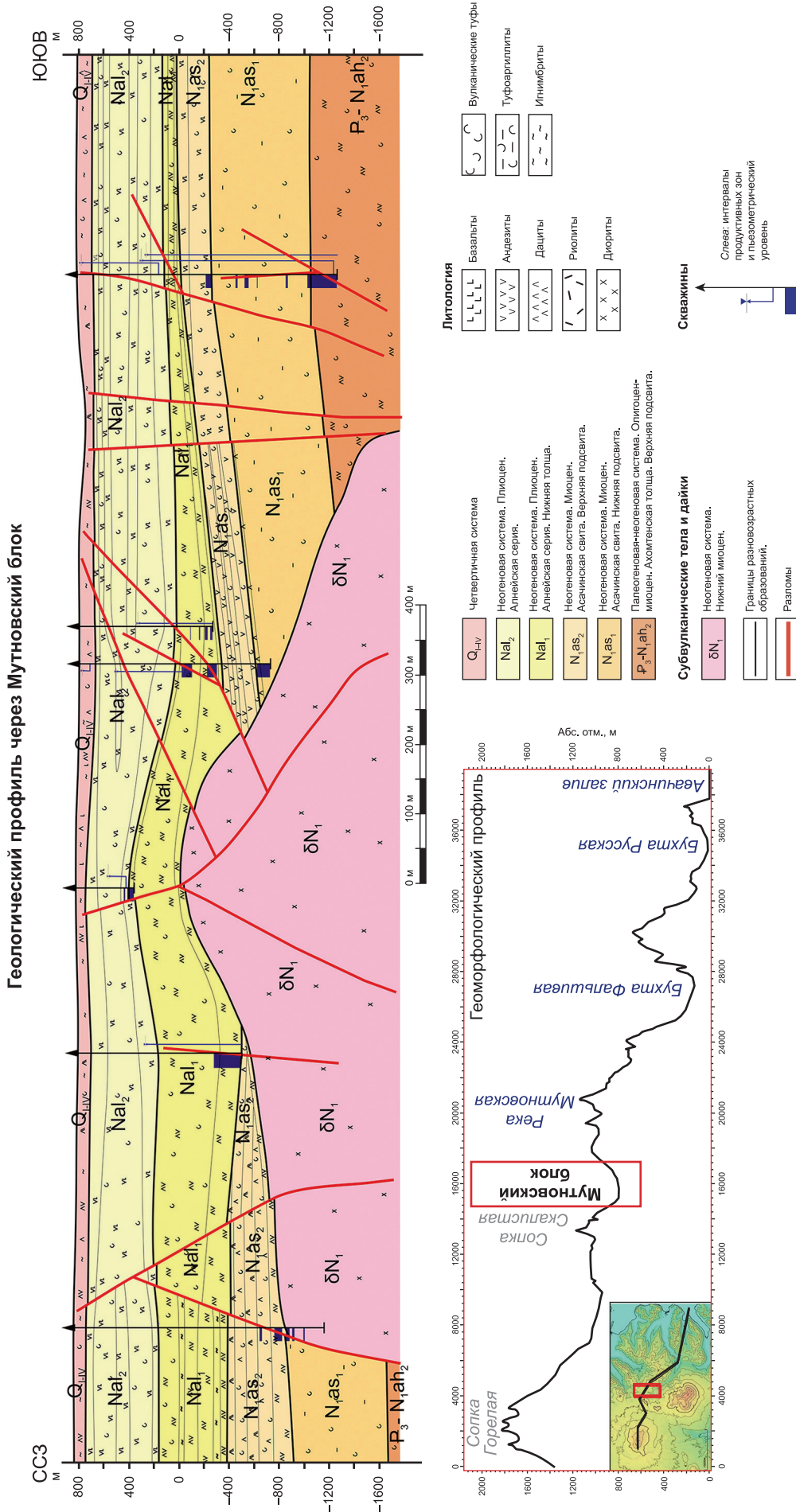


Рис. 5. Геологический и геоморфологический профили через Мутновский блок (Камчатка), в пределах которого расположено Мутновское месторождение парогидротерм [Георгиевский и др., 2025]

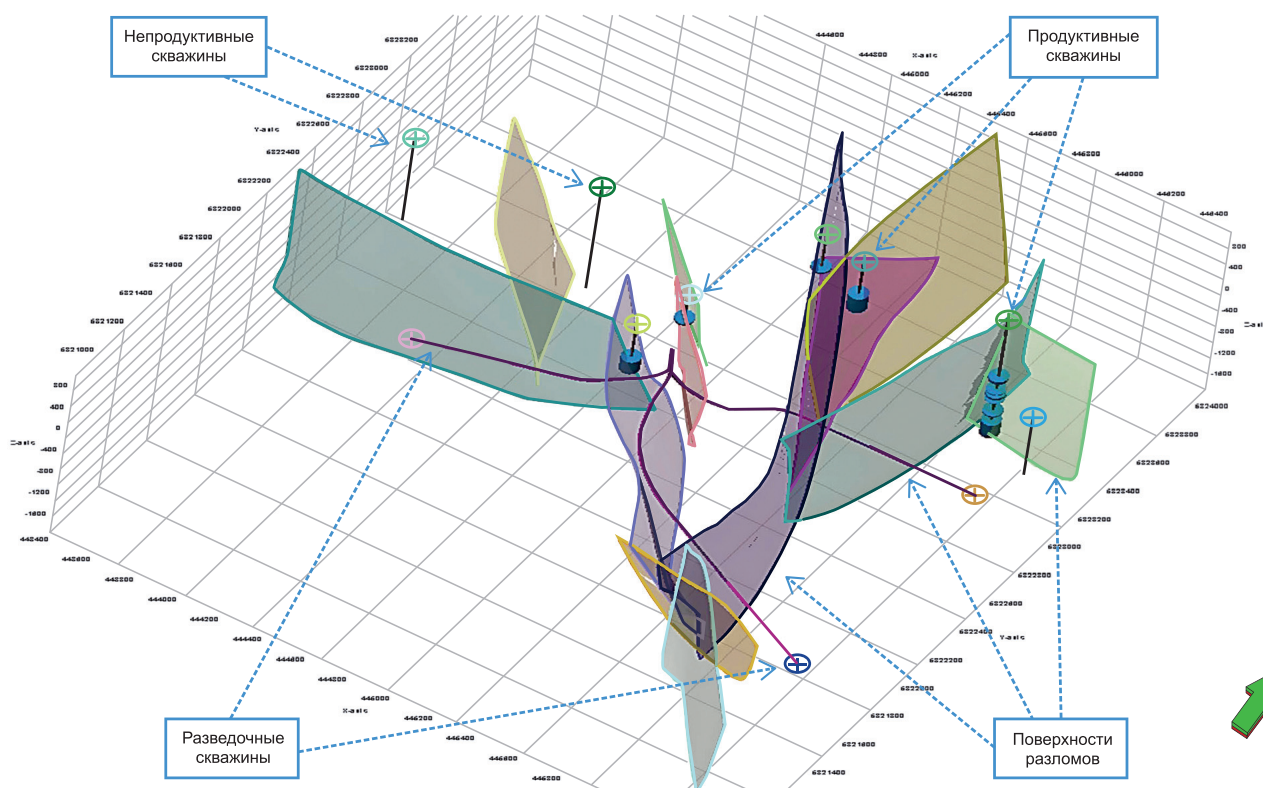


Рис. 6. Фрагмент тектонической модели участка парогидротермального месторождения Мутновского блока (Камчатка)

перекрыты игнимбритами кальдеры влк. Горелая Сопка и отложениями современных стратовулканов. Грабенообразное понижение к северу от вулкана, прорезанное разломами субширотного и северо-восточного простирания, представляет собой тектонически ослабленную зону. Наиболее интенсивные проявления пара на протяжении всей Северо-Мутновской зоны приурочены к узлам пересечения этих разломов различных направлений, то есть на тех участках, где тектоническая раздробленность пород максимальна.

Именно с этой структурно-геологической особенностью и связана основная специфика геотермальных месторождений Мутновского блока. Структурно-геологическим строением и тепловым режимом определяются следующие основные геологические риски, которые должны быть минимизированы оптимально выбранной стратегией доразведки месторождения, направленной на достижение максимальной эффективности при локализации геотермальных ресурсов для последующего освоения. По причине наличия существенных неопределенностей в строении объекта, его слабой степени изученности, отсутствия четких прогнозных критериев для выбора наиболее продуктивных зон, наличие эффективной стратегии поиска и разведки месторождения имеет ключевое значение.

Успешность исторического бурения и доля работающих скважин в пределах Мутновского блока составляет менее 25% [Бутузов и др., 2002]. Повышение геологической успешности бурения каждой отдельной скважины имеет важное значение, так

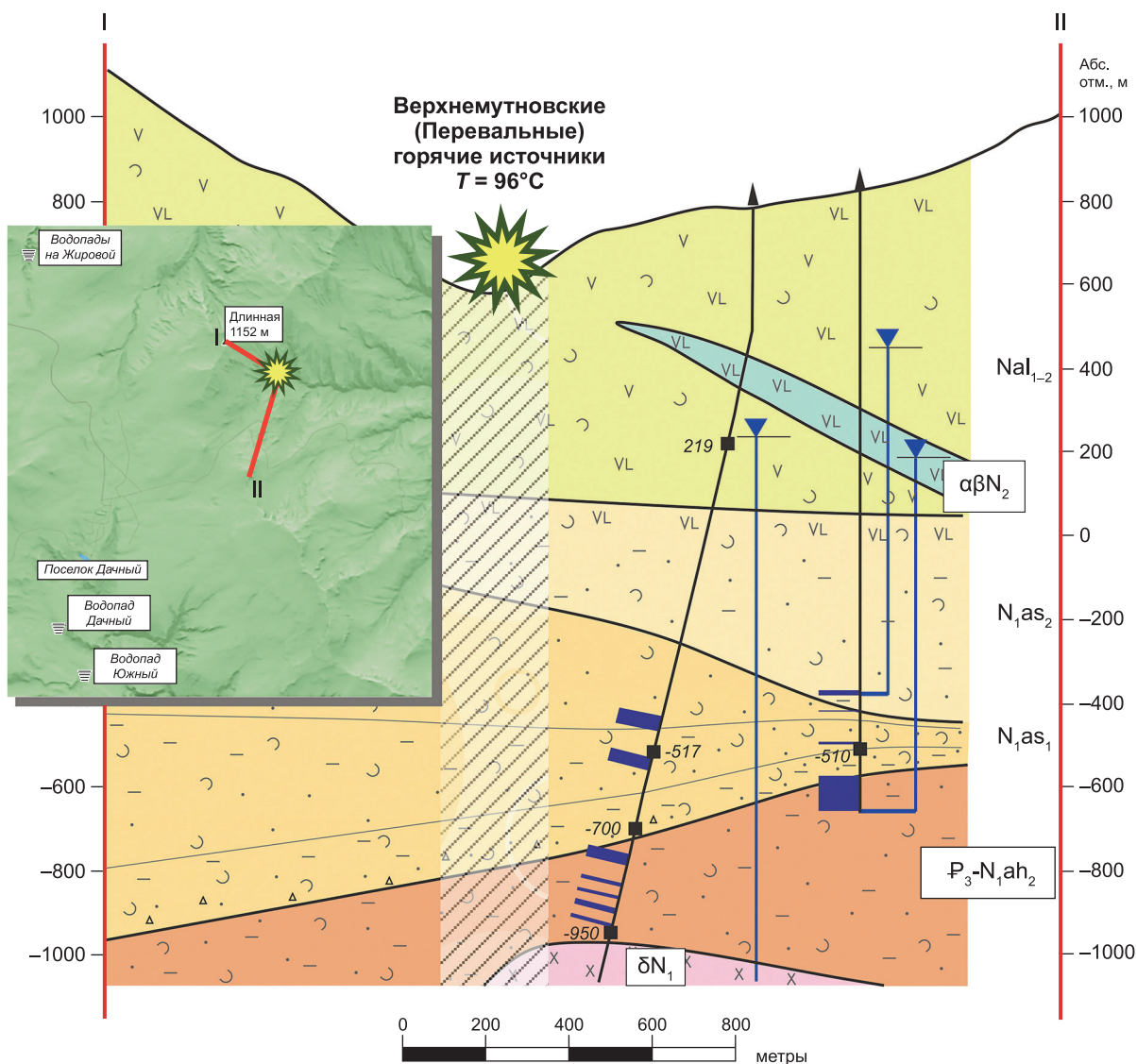
как КПД преобразования геотермальной энергии в электрическую составляет менее 20%, при этом для получения мощности 1МВт необходимо получение соответствующего дебита 2 кг/с пара. Для сравнения, ГеоЭС на Верхне-Мутновском участке в пределах Мутновского блока имеет мощность 12 МВт, то есть соответствующая мощность уже может поддерживаться единичными скважинами.

Основные геологические риски, которые могут реализоваться при поисково-разведочном бурении, связаны с:

- отсутствием флюида и (или) путей миграции;
- отсутствием теплоносителя или охлаждением за счет привноса поверхностных вод;
- вторичными изменениями пород, приводящими к отсутствию свободной миграции.

Более детально разберем некоторые ключевые особенности, позволяющие минимизировать указанные риски. Для проведения поисково-разведочных работ в пределах Мутновского блока была построена геологическая модель, включающая как стратиграфическое, так и структурно-тектоническое строение (фрагмент которой приведен на рис. 6), учитывающий геолого-структурные и эволюционные черты строения объекта, позволяющая учесть неопределенности структурно-геологического строения, а, следовательно, как было описано выше, локализовать зоны наиболее вероятного наличия ПВС как основного поискового объекта.

Как показано на рис. 6, имеется четкая закономерность расположения непродуктивных скважин исторического фонда, расположенных вне зон разло-



Na₁₋₂	Неогеновая система. Плиоцен. Алнейская серия.		Базальты		Вулканические туфы
N_{1as2}	Неогеновая система. Миоцен. Асачинская свита. Верхняя подсвита.		Андезиты		Туфоконгломераты
N_{1as1}	Неогеновая система. Миоцен. Асачинская свита. Нижняя подсвита.		Туфо-андезолиты		Туфопесчаники
P₃-N_{1ah2}	Палеогеновая-неогеновая системы. Олигоцен-миоцен. Ахонтенская толща. Верхняя подсвита.		Туфо-аргиллиты		Диориты

Субвулканические тела и дайки

αβN₂	Неогеновая система. Плиоцен.		Выход горячих подземных вод на поверхность
δN₁	Неогеновая система. Нижний миоцен.		Зона трещиноватости

Скважины

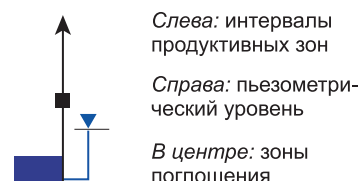


Рис. 7. Фрагмент геологического разреза Мутновского блока (Камчатка) вблизи Верхнемутновских (Питателевских) горячих источников

мов, а при этом основные продуктивные скважины приурочены именно к ослабленным тектоническим зонам и, главное, к зонам пересечения таких тектонических нарушений. Такая модель является мощным прогнозным инструментом, позволяющим выбрать наиболее оптимальные траектории новых поисково-разведочных скважин, которые пересекают наибольшее количество ослабленных, в пределах которых и предполагается наличие ПВС и зоны миграции флюида. Примеры траекторий, наклонно-направленных поисково-разведочных скважин показаны на рис. 6.

Следующей существенной неопределенностью строения геотермальных месторождений Камчатки является гидрогеологический режим питания, источники, объемы и схемы питания, каналы миграции и наличие выдержанных водоносных горизонтов. С этим фактором также тесно связана количественная оценка теплопереноса, осуществляемого подвижным флюидом. Применительно к Мутновскому блоку данная неопределенность также имеет ключевое значение и может быть продемонстрирована на следующем фрагменте геологического строения участка, в районе Верхнемутновских (Перевальных) горячих источников (рис. 7).

Как показано на профиле, в непосредственной близости от выходов на поверхность горячих источников подземных вод пробурено две скважины, каждая из которых является продуктивной. Однако для корректного анализа геологического строения и геологического моделирования необходимо учитывать следующие факторы. Во-первых, литологическое строение разреза, вскрытого соседними скважинами, может демонстрировать существенную вариацию литологического состава и мощностей вулканических комплексов (что является прямым отражением истории геологического развития блока, описанной выше). Во-вторых, зоны продуктивности в скважинах не привязаны к конкретным стратиграфическим комплексам либо гипсометрическим отметкам, имеют разную расчлененность и мощность. Также различия наблюдаются и в локализации зон поглощения, описанных в скважинах. И, наконец, в-третьих: пьезометрические уровни в каждой из скважин существенно ниже, чем гипсометрическая отметка выходов термальных источников.

Все эти особенности строения помогают сделать выводы о том, конфигурация зон поглощения и положение водонасыщенных интервалов должны анализироваться не только с позиции стратиграфического разреза, но и, главным образом, с позиции структурного фактора. А столь резкие колебания и различия в пьезометрическом уровне близкорасположенных скважин (одновременно со значительными вариациями вскрытых в скважинах геологических разрезов) и отметках выхода горячих источников на поверхность напрямую свидетельствуют о наличии гидродинамически не связанных между собой проводящих каналов (по которым ми-

грирует флюид), а также о наличии более широких ослабленных зон, к которым могут быть приурочены и естественные выходы термальных вод, и наиболее высокодебитные скважины. Именно к одной из таких зон и приурочены Верхнемутновские горячие источники, расположенные в зоне, морфологически выраженной в рельефе в виде прямолинейной узкой долины широтного простираия (рис. 7).

Таким образом, оптимальная стратегия поиска и разведки геотермальных месторождений Камчатки, позволяющая минимизировать геологические риски и добиться максимальной эффективности, основана на комплексировании совокупности параметров, включающих следующие составляющие [Георгиевский и др., 2025]:

- геологическое строение, стратиграфию, литолого-петрографическое вулканических комплексов, их фильтрационно-емкостные и реологические свойства;

- гидрогеологический режим, источники питания, режимы инфильтрации, миграция по близповерхностным и глубинным трещиноватым зонам и разломам различной степени раскрытости;

- геотермический режим, механизмы теплопереноса, оценку глубинного теплового потока и конвективного теплопереноса флюидами.

При этом наличие моделей, учитывающих в комплексе данные геологического строения, теплофизические параметры, исторический фонд, результаты бурения и режимы работы скважин позволяет оперативно корректировать последовательность поисково-разведочных работ и выбирать наиболее оптимальные шаги, минимизирующие возникающие геологические риски.

Заключение и выводы. На сегодняшний день геотермальная энергия находится на этапе перехода из категории узколокального ресурса в глобальный, играя все более важную роль в обеспечении устойчивого и надежного энергоснабжения по всему миру. В России развитая геотермальная энергетика Камчатки, где действуют Мутновская и Паужетская ГеоЭС, является наглядным примером успешного замещения дорогостоящего ископаемого топлива, что наглядно демонстрирует возможности трансформации геотермальной энергетик из альтернативной в экономически целесообразную и стратегически необходимую для энергообеспечения территорий. Кроме того, актуальность гидротермальной энергетик выходит за рамки электрогенерации, так как служит дополнительно основой для развития смежных отраслей от промышленного теплоснабжения до рекреации и бальнеологии. Иным важным аспектом актуальности данного вида энергетик в России является слабая степень освоения при наличии уже разведанных геотермальных ресурсов. Огромные величина низко- и среднетемпературных геотермальных ресурсов характерна для Краснодарского и Ставропольского краев, Западной Сибири, За-

байкаля, Чукотки и других. И хотя ряд факторов, таких как низкая плотность населения, удаленность и отсутствие инфраструктуры, делают масштабные проекты коммерчески сложными, геотермальная энергия могла бы стать идеальным решением для энергоснабжения изолированных поселков.

Успешный пример проведения поисково-разведочных работ на Камчатке, в пределах Мутновского блока, позволит расширить опыт и успешные отработанные геолого-разведочные этапы и в других регионах России. Поэтому с позиции развития нового направления и наращивания теплоэнергетических мощностей выработка корректной, эффективной

стратегии при минимизации объективных геологических рисков является одной из первоочередных задач.

Таким образом, специфика исследования гидро-термальных систем и стратегия поиска и разведки для последующего экономически эффективного освоения заключается в реализации междисциплинарного подхода. Данные гидрогеологии, геологии и тектоники не просто суммируются, а интегрируются в единую модель. Только такой целостный взгляд позволяет минимизировать риски и превратить природное тепло Земли в надежный и экономически эффективный источник энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бадавов Г.Б. Геотермальная энергетика: всемирный обзор 2020 // С.О.К. 2021. № 12. С. 66–74.

Бадавов Г.Б. Прямое использование геотермальной энергетике: всемирный обзор 2020 // С.О.К. 2021. № 8. С. 60–78.

Бутузов В.А., Томаров Г.В., Алхасов А.Б. и др. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электро-энергетика, теплоснабжение (обзор) // Теплоэнергетика. 2002. № 1. С. 3–17.

Георгиевский Б.В., Симаков Я.О., Хамитов А.Т. и др. Геологические предпосылки формирования и закономерности расположения геотермальных месторождений // Сборник трудов «Тезисы IX Балтийской научно-практической конференции «BalticPetroModel-2025. Петрофизическое моделирование осадочных пород». Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2025. С. 96–101.

Еремин Н.Н., Ситар К.А., Барановская Е.И. и др. Геологические предпосылки энергетических природных ресурсов Африки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 100–113.

Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф. Гидрогеология вулканогенов. РАН, Ин-т вулканологии и сейсмологии. СПб.: Наука, 2010. 394 с.

Свалова В.Б. Геотермальная энергетика в России и мире и гидрогеотермальные системы Кавказа // Мониторинг. Наука и технологии. 2022. № 2(52). С. 43–53.

Спектор С.В., Красников Р.В., Попов Е.В. Термальные подземные воды России: распространение, запасы и проблемы освоения // Недропользование XXI век. 2024. № 5–6 (105). С. 65–75.

Шарапов В.Н., Симбирев И.Б., Третьяков Г.А. и др. Магматизм и гидротермальные системы Мутновского блока Южной Камчатки. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1979. 143 с.

Huttrer G. W. Geothermal Power Generation in the World 2015–2020 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik, Iceland, 2020. 39 p.

Lund J. W., Toth A. N. Direct Utilization of Geothermal Energy: 2020 Worldwide Review. Proc. of the 2020 World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland, 2020. 39 p.

The Future of Geothermal Energy / International Energy Agency. France: International Energy Agency, 2024. 126 p.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 27.02.2026