

УДК 550.341.5

## ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ КАМЧАТКИ И БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ОСВОЕНИЯ

© 2019 г. А. В. Кирюхин\*, В. М. Сугробов\*\*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9*

*\*e-mail: avkiryukhin2@mail.ru*

*\*\*e-mail: sugrvn@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.04.2019 г.

Прогнозные геотермальные ресурсы Камчатки достаточны для выработки 3900 МВт электрической энергии. Такие же ресурсы для теплообеспечения оцениваются мощностью 1350 МВт<sub>т</sub> (тепловых). Термогидродинамическое TOUGH2-моделирование эксплуатации уже выявленных продуктивных гидрогеотермальных резервуаров с установленными фильтрационно-емкостными и энергетическими свойствами позволяет прогнозировать: 1) возможность увеличения электропроизводительности уже эксплуатирующихся участков Мутновского месторождения до 105 МВт и Паужетского месторождения до 11 МВт с использованием бинарных технологий; 2) возможность увеличения выработки тепловой энергии на Паратунском месторождении с погружными насосами до 216 МВт<sub>т</sub>, что полностью обеспечит теплоснабжение систем централизованного теплоснабжения города Петропавловск-Камчатский.

**Ключевые слова:** геотермальные ресурсы, термогидродинамическое моделирование, TOUGH2, Камчатка.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019650-65>

### ВВЕДЕНИЕ

Природные гидротермальные системы разделяются на высокотемпературные (с температурой в недрах выше 150°C), и системы с температурой менее 150°C (среднетемпературные и низкотемпературные, по [Muffler, 1979]).

Авторами статьи под **геотермальными ресурсами** понимают источники формирования извлекаемой скважинами тепловой геотермальной энергии, а под **прогнозными** — долю возможного расхода теплоотбора продуктивных скважин (МВт<sub>т</sub> тепловых), преобразуемую в полезную механическую мощность для высокотемпературных систем или в потребляемую тепловую мощность для систем с температурой менее 150°C. Характерной особенностью Камчатки является широкое развитие локальных термоаномалий, связанных с активной вулканической деятельностью, интенсивными процессами гидротермального изменения горных пород и аномально высоким выносом из недр тепла и вещества. В данной статье наряду с геотермальными ресурсами высокотемпературных гидротермальных систем, которые уже используются или могут быть использованы в электрогенерирующих теплоэнергетических установках, оцениваются другие виды ресурсов — гидротер-

мальные системы с температурой менее 150°C и петрогеотермальные, включая ресурсы тепла неглубокозалегающих магматических очагов.

Термальные источники и другие поверхностные термопроявления являются индикаторами существования в недрах гидротермальных систем (геотермальных месторождений). Величина выноса тепла поверхностными термопроявлениями (мощность их тепловой разгрузки) определяет возобновляемую минимальную величину их геотермальных ресурсов. В таблице 1 приводятся уточненные и, как нам представляется, наиболее полные сведения о выносе тепла естественными термопроявлениями. Наиболее интенсивно глубинное тепло выносится более крупными гидротермальными системами и термопроявлениями, расположенными в Восточно-Камчатском и Центральном-Камчатском вулканических поясах.

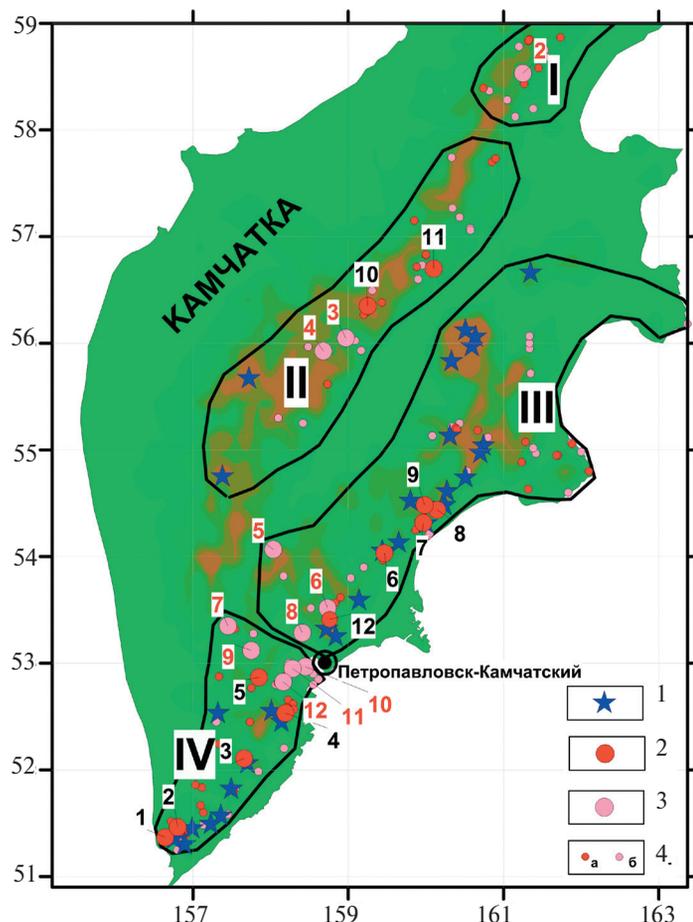
Оценки геотермальных ресурсов, изложенные в работах [Sugrobov, 1995; Сугробов и др., 2005 и др. работы], изменялись по мере углубления наших знаний о конкретных геотермальных объектах и совершенствования методов их изучения.

Данные о прогнозных геотермальных ресурсах гидротермальных систем и месторождений, приведенных ниже, можно использовать в качестве

исходных для выбора объектов при постановке дальнейших разведочных работ. Заметим, что все усиливающееся использование геотермальных ресурсов для получения электрической и тепловой энергии связано с важностью экономии органического топлива, особенно в районах, не имеющих собственных запасов нефти и газа. К тому же применение геотермальных установок для получения энергии минимально загрязняет окружающую среду, особенно при возможности обратной закачки отработанных вод и конденсата пара в геотермальные резервуары.

ОЦЕНКА ВЫНОСА ТЕПЛА ПОВЕРХНОСТНЫМИ ТЕРМОПРОЯВЛЕНИЯМИ (МОЩНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ РАЗГРУЗКИ)

Около 150 групп термальных источников, характеризующихся различными температурами и химическим составом воды, в том числе 11 высокотемпературных гидротермальных систем, расположенных в Восточно-Камчатском и Центрально-Камчатском вулканических поясах, объединены Ю.Ф. Манухиным и В.М. Сугробовым в четыре геотермальные провинции<sup>1</sup> (рис. 1).



**Рис. 1.** Расположение основных групп горячих источников и гидротермальных систем Камчатки. Геотермальные провинции: I – Северо-Камчатская, II – Центрально-Камчатская, III – Восточно-Камчатская, IV – Южно-Камчатская.

1 – активные вулканы; 2 – высокотемпературные гидротермальные системы (1 – Кошелевская, 2 – Паужетская, 3 – Ходуткинская, 4 – Мутновская, 5 – БольшеБанная, 6 – Карымская, 7 – Семьячикская, 8 – Гейзерная, 9 – Узонская, 10 – Апапельская, 11 – Киреунская, 12 – Северо-Корякская), см. табл. 1, табл. 2; 3 – гидротермальные системы с температурой резервуара менее 150°C (2 – Русаковская, 3 – Анавгайская, 4 – Эссовская, 5 – Пушинская, 6 – Налычевская, 7 – Малкинская, 8 – Пиначевская, 9 – Начикинская, 10 – Южно-Бережная, 11 – Паратунская, 12 – Верхне-Паратунская), см. табл. 3; 4 – группы термальных источников с температурой от 50 до 100°C (а) и с температурой от 20 до 50°C (б).

<sup>1</sup> Ворожейкина Л.А., Манухин Ю.Ф., Сугробов В.М. и др. Отчет о работе по теме: Прогнозная оценка геотермальных ресурсов Камчатской области. Этап – Геолого-экономическая оценка геотермальных объектов, первоочередных для освоения и проведения геологоразведочных работ до 1990 года. Петропавловск-Камчатский: КТГУ, КПУ по ИГТЗ, ИВ ДВНЦ АН СССР, ФГУ “КТФГИ”, 1980.

Помимо указанных выше 11-ти высокотемпературных гидротермальных систем в результате исследований, проведенных в последние годы в северном секторе Корякского вулкана можно выделить Северо-Корякскую гидротермальную систему (см. рис. 1, № 12) с прогнозными температурами до 300°C и значительными естественными ресурсами термальных вод [Kiryukhin et al., 20176].

Оценка выноса тепла поверхностными термопроявлениями сделана для четырех геотермальных провинций, приуроченных к вулканическому поясам, причем отдельно подсчитан вынос тепла термальными источниками не связанных с высокотемпературными системами (см. табл. 1). Мощность естественной тепловой разгрузки высокотемпературных гидротермальных систем определена по сумме мощностей открытой разгрузки гидротерм, их скрытой разгрузки в поверхностные водотоки, теплоотдачи с поверхности нагретого грунта и термальных водоемов, кондуктивных теплопотерь через кровлю резервуара.

В Северо-Камчатской геотермальной провинции выявлено 16 групп термальных источников с различной температурой, максимальная (75–95°C) зафиксирована в источниках Паланских и Русаковских.

В Срединно-Камчатской провинции находятся 26 групп термальных источников, в том числе Киреунские и Апапельские кипящие источники (поверхностные проявления одноименных высокотемпературных систем).

В Восточно-Камчатской провинции известно 52 группы термальных источников, большая часть расположена в Восточно-Камчатском вулканическом поясе. Среди них выделяются кипящие источники и паровые струи крупных гидротермальных систем: Узонской, Гейзерной, Семячинской, каждая из которых обладает мощностью тепловой разгрузки 268 МВт, 321 МВт, 314 МВт, соответственно.

В Южно-Камчатской провинции насчитывается 55 разнообразных термопроявлений, в том числе связанных с высокотемпературными систе-

мами Мутновской, Больше-Банной, Паужетской и Кошелевской. Гидротермальные системы провинции наиболее изучены с помощью буровых скважин, а выделенные при этом разведкой геотермальные месторождения обеспечивают использование их ресурсов геотермальными электростанциями (ГеоЭС). Это Паужетское и Мутновское месторождения. Разведочное бурение проводилось в этой провинции еще на двух месторождениях, высокотемпературных Больше-Банной и Нижне-Кошелевской систем.

Геотермальные ресурсы термальных вод, формирующиеся под воздействием регионального теплового потока вне пределов развития современных поверхностных термопроявлений, изучены менее детально. Площади их бассейнов выделены в отдельную геотермальную провинцию — крупных структурных депрессий. Эта провинция объединяет Западно-Камчатский прогиб, Центральный Камчатский прогиб, Восточно-Камчатский прогиб и другие, более мелкие структуры [Кононов, Сугробов, 1997].

#### ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Оценка прогнозных геотермальных ресурсов производилась двумя основными способами: 1) по величине выноса тепла естественными термопроявлениями на площади систем и месторождений (мощности тепловой разгрузки); 2) по данным определения тепловой энергии резервуара, содержащейся в горных породах, насыщенных флюидом, и распространенных в пределах гидротермальных систем.

##### *Оценка прогнозных геотермальных ресурсов по величине выноса тепла естественными термопроявлениями*

Эта оценка основывается на допущении, что мощность тепловой разгрузки, определяемая по сумме выноса тепла естественными поверхностными термопроявлениями, отождествляется с минимальными геотермальными ресурсами,

**Таблица 1.** Вынос тепла естественными термопроявлениями Камчатки

Термальные источники, гидротермальные системы	Вынос тепла, МВт <sub>т</sub>							Камчатка в целом
	Геотермальные провинции				Вулканические пояса			
	I	II	III	IV	Центрально-Камчатский	Восточно-Камчатский	Пояса в целом	
Термальные источники	81.3	21.8	198.3	230.8	288.8	114.5	403.3	532.2
Высокотемпературные системы	-	40.5	1049.0	692.2	119.5	1662.2	1781.7	1781.7
Сумма	81.3	62.3	1247.3	923.0	408.3	1776.7	2186.0	2313.9

увеличение которых возможно при вскрытии глубоких горизонтов скважинами в процессе разведки и эксплуатации месторождений. Порядок такого увеличения (коэффициент увеличения) определен по сопоставлению полученного из продуктивных скважин расхода теплоотбора на разведанных геотермальных месторождениях и оценок мощности естественной тепловой разгрузки гидротерм. Например, для Паужетского месторождения расход теплоотбора из продуктивных скважин разведанного участка почти в три раза превышает величину естественной разгрузки гидротерм, при стабильной работе водозабора и постоянстве температуры и давления в скважинах [Сугробов, 1976]. При выносе тепла естественными термопроявлениями Паужетского геотермального поля в 63 МВт отбор тепла скважинами при стабильном режиме на Северном участке месторождения составил 146 МВт, а при тепловой мощности всей системы в 104 МВт суммарный отбор тепла геотермальными скважинами на месторождении мог бы достигнуть 350 МВт. Еще более значительное увеличение расхода теплоотбора было отмечено на Больше-Банном месторождении. Данные по зарубежным геотермальным месторождениям (Вайракей — Новая Зеландия; Лардерелло — Италия; Гейзеры Калифорнии — США и др.) также свидетельствуют о том, что отбор тепла скважинами превосходит вынос тепла естественными термопроявлениями в несколько раз. Например, в Вайракей скважинами отбирается около 2300 МВт, мощность тепловой разгрузки — 418 МВт.

Показательны в связи с этим данные о соотношении отбора тепла скважинами и мощностью начальной тепловой разгрузки при длительной эксплуатации Паужетского и Мутновского геотермальных месторождений. Отбор тепла при длительной эксплуатации Паужетского месторождения [Kiryukhin, Yampolsky, 2004; Kiryukhin et al., 2008] и многолетней — Мутновского месторождения [Kiryukhin et al., 2018] превышает начальную естественную разгрузку в 3–4 и 6–7 раз, соответственно, то есть значение коэффициента увеличения близко к его определению по данным начального периода эксплуатации месторождений. Поэтому можно полагать, что количественные соотношения прогнозируемого теплоотбора на геотермальных месторождениях и выноса тепла естественными термопроявлениями не случайны и позволяют подойти к оценке возможного энергетического потенциала высокотемпературных геотермальных объектов Камчатки.

Оценка прогнозных геотермальных ресурсов для месторождений Камчатки, приуроченных к высокотемпературным гидротермальным

системам, выполнена с использованием коэффициента увеличения мощности тепловой разгрузки равного 4 и 7 и коэффициента перехода в полезную работу тепловой энергии на устье скважин 0.23 [Assessment ..., 1979]. С учетом этого, прогнозные геотермальные ресурсы высокотемпературных гидротермальных систем, исключая Гейзерную, Семьячикскую и Узонскую, расположенных в Кроноцком заповеднике, составляют около 1700 МВт<sub>т</sub> (табл. 2).

*Оценка прогнозных геотермальных ресурсов по данным определения тепловой энергии резервуара*

Этот подход, обоснованный в работах зарубежных специалистов [Muffler, Cataldi, 1978], базируется на определении тепловой энергии, содержащейся в горных породах, насыщенных флюидом и распространенных в пределах гидротермальных систем. Тепловая энергия резервуара рассчитывается по объему блока, слоя или резервуара нагретых горных пород, удельному теплосодержанию горных пород и их температуре. Предполагается столетняя эксплуатация геотермальных резервуаров.

При определении объема резервуара его мощность для всех систем принята одинаковой (2.5 км), исходя из залегания кровли на глубине 0.5 км и базовой глубины системы — 3 км. Объем резервуаров оценивается по размеру площади, определяемой по распространению поверхностных термопроявлений, особенностям геологического строения участка и гидрогеологических условий.

Температура в недрах систем, оцененная по химическим геотермометрам, расчету по данным измерения теплового потока или измерениям в скважинах, изменялась от 150 до 220°C для горячеводных систем и от 200 до 310°C для пародоминирующих. Однако, распределение температуры в конкретных резервуарах для большинства систем еще неизвестно, так как не проводилось разведочное бурение. Поэтому для приближенных расчетов термальной энергии в резервуаре температура принималась средней, одинаковой для всех горячеводных систем — 200°C и пародоминирующих систем — 220°C.

Удельная теплоемкость пород, насыщенных водой и паром, и представленных, главным образом, вулканитами и вулканогенно-осадочными породами, принималась равной 2.7 Дж/см<sup>3</sup>°C [Assessment ..., 1979]. Тепловая энергия резервуара ( $q_R$ ) определяется по формуле  $q_R = VC(T - T_1)$ , где  $T$  — средняя температура (°C) в недрах системы в слое 0.5–3.0 км,  $T_1$  — среднегодовая температура воздуха (для Камчатки около 0°C),  $C$  — удельная теплоемкость горных пород, насыщенных флюидом (2.7 Дж/см<sup>3</sup>°C). Используя

Таблица 2. Прогнозные геотермальные ресурсы высокотемпературных гидротермальных систем и геотермальных месторождений Камчатки

№ на рис. 1	Гидротермальные системы и месторождения	Состояние теллоносителя на поверхности	Естественная тепловая разгрузка, МВт <sub>т</sub>	Площадь распространения термопроявлений км <sup>2</sup>	Объем резервуара, км <sup>3</sup>	Средняя температура резервуара (максимальная в скважинах), °С	Тепловая энергия резервуара, 10 <sup>18</sup> Дж	Прогнозные геотермальные ресурсы, МВт <sub>т</sub>	
								по тепловой энергии резервуара	по естественной тепловой разгрузке
1	Кошелевская	Перегретый инасыщенный пар	314 <sup>1)</sup>	15 ± 4.5	37.5 ± 11.2	220	22.27 ± 6.7	431 ± 129	505.5
	Нижне-Кошелевское								
2	Паужетская	Насыщенный пар и вода	104 <sup>2)</sup>	18 ± 5.4	45 ± 13.5	200 (220)	25.78 ± 7.73	466 ± 140	95.7
	Паужетское								
3	Ходуткинская	Горячая вода, источники 88°С	42 <sup>3)</sup>	12.0 ± 3.6	30 ± 9	200	16.2 ± 4.8	293 ± 88	29
4	Мутновская	Перегретый и насыщенный пар	546 <sup>4)</sup>	32 ± 9.6	80 ± 24	220	47.52 ± 14.2	920 ± 276	879
	Северо-Мутновское								
5	Больше-Банная	Вода (кипение)	79 <sup>5)</sup>	6 ± 1.8	15 ± 4.5	200(171)	8.1 ± 2.43	147 ± 44	72.7
6	Карымская		146 <sup>6)</sup>	15 ± 4.5	37.5 ± 11.2	200	20.25 ± 6.1	366 ± 110	100.7
			16 <sup>7)</sup>			200			
11	Киреунская		24.5 <sup>8)</sup>	7 ± 2.1	17.5 ± 5.2	200	9.45 ± 2.83	171 ± 51	16.9
Итого								2794 ± 838 <sup>9)</sup>	1710.5

Примечание. Данные по тепловой разгрузке: 1) Е.А. Вакин, 1976; 2) В.М. Сутробов, 1976; 3) Т.П. Кирсанова, И.В. Мелкесцев, 1984; 4) Е.А. Вакин, 1976а; 5) Ю.А. Краевой и др., 1976; 6) Г.Ф. Пилипенко, 1989; 7) 8) Т.П. Кирсанова, 1971; 9) данные по геотермальным ресурсам Нижне-Кошелевского, Паужетского и Северо-Мутновского месторождений включены в показатели соответствующих гидротермальных систем.

соотношение тепловой энергии резервуара к полезной работе 0.057 и 0.061 [Assessment ..., 1979, с. 26, рис. 5], соответственно, для резервуаров со средней температурой 200 и 220°C, рассчитываются геотермальные ресурсы, значения которых для конкретных объектов приведены в табл. 2. Суммарная их величина (около 2800 МВт<sub>т</sub>) имеет тот же порядок, что и ресурсы, определенные по выносу тепла естественными термопроявлениями (1710 МВт<sub>т</sub>). На эти оценки следует ориентироваться при постановке разведочного или эксплуатационного бурения.

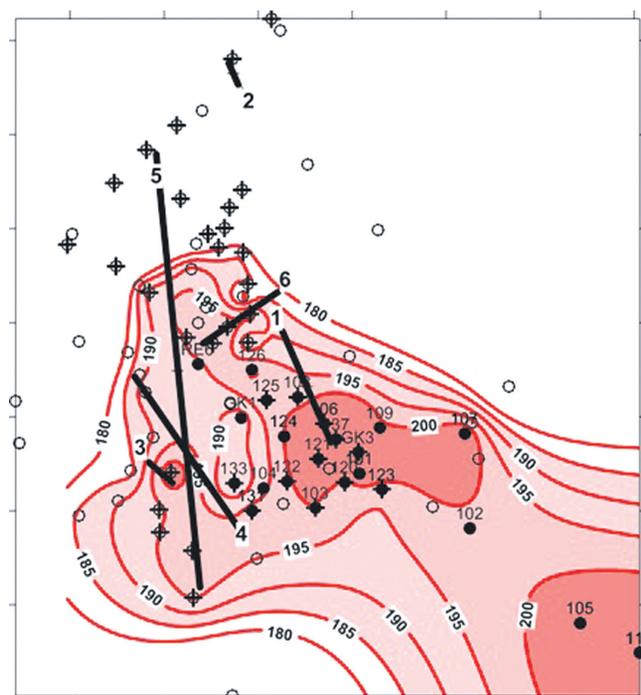
Полученные величины прогнозных ресурсов приблизительно эквивалентны 1120 МВт и 680 МВт электрической мощности соответственно. Точная оценка величины электрической мощности определяется характеристиками и КПД используемых энергетических установок.

*Прогноз электропроизводительности высокотемпературных месторождений*

В пределах высокотемпературных систем (Паужетской, Больше-Банной, Кошелевской и Мутновской) на четырех месторождениях проведены геологоразведочные работы с применением бурения скважин.

**Паужетское месторождение.** С 1967 г. на базе месторождения работает Паужетская ГеоЭС, установленная мощность которой составляет сейчас 12 МВт<sub>э</sub>. Анализ данных по термогидродинамическому и газогидрохимическому режиму, полученных при эксплуатации месторождения в 1960–2006 гг., и последующее численное термогидродинамическое моделирование привели к следующим результатам [Kiryukhin, Yampolsky, 2004; Kiryukhin et al., 2008].

Уточнена концептуальная гидрогеологическая модель Паужетского геотермального месторождения. Высокотемпературный гидротермальный резервуар приурочен к верхнемиоцен-плейстоценовому артезианско-вулканогенному бассейну (АВБ), имеет пластовое строение и залегает субгоризонтально на участке длиной не менее 2 км в широтном направлении и не менее 2.5 км в меридиональном направлении. Его средняя вскрытая мощность около 500 м, в центральной части месторождения гидротермальный резервуар пронизан дацитовым экстрезивным комплексом Q<sub>2-3</sub> и сообщается с системой каналов, подводящих теплоноситель из олигоцен-миоценового вулканогенно-осадочного фундамента (рис. 2). На рис. 2 показаны также проекции шести про-



**Рис. 2.** Структурный контроль Паужетского продуктивного геотермального резервуара [Kiryukhin, Yampolsky, 2004]. Линиями показано распределение температуры в продуктивном геотермальном резервуаре (температуры усреднены в интервале –500, 0 м абс.). Черные кружки с заливкой – скважины, вскрывшие дацитовый экстрезивный комплекс Q<sub>2-3</sub>; крестиками – инъекционные скважины с высокой приемистостью. Жирные черные линии с указанием № разлома – проекции продуктивных разломов, рассчитанных как площадки плоско-ориентированных кластеров продуктивных зон, вскрытых скважинами, с использованием программы Frac-Digger2 на абс. отм. –350 м (для сравнения может быть использована схема линейных тектонических нарушений, показанная на рис. 1 в работе [Феофилактов и др., 2017], составленной по дешифрированию аэрофотоснимков, геохимическим, геофизическим и другим данным). Разметка осей – 500 м.

дуктивных разломов на абс. отм. –350 м, из них следует выделить разлом № 1, характеризующийся углом падения  $71^\circ$  на СВВ и выводящий 32% суммарной продукции, а также продуктивные разломы № 2, № 3 и № 4 с углами падения до  $30^\circ$  и выводящими вместе 53% суммарной продукции теплоносителя.

Трехмерная численная термогидродинамическая TOUGH2-модель Паужетского геотермального месторождения охватывает область  $13.6 \text{ км}^2$  и включает три слоя: 1) фундамент месторождения, вмещающий подводящие каналы теплоносителя; 2) гидротермальный резервуар; 3) верхний водоупор с проницаемыми “окнами”, через которые осуществлялась разгрузка теплоносителя до начала эксплуатации и инфильтрационное питание гидротермального резервуара в процессе эксплуатации. С помощью моделирования выявлены и оценены независимые ключевые параметры, контролируемые: 1) тепловую и массовую емкость гидротермального резервуара, 2) суммарный приток глубинного теплоносителя, 3) притоки холодных метеорных вод через инфильтрационные окна в верхнем водоупоре. Инверсионное iTOUGH2 моделирование впервые позволило оценить источники формирования эксплуатационных запасов Паужетского геотермального месторождения: 25.7% составляют естественные и привлекаемые ресурсы глубинного теплоносителя, 30% – инфильтрация холодных метеорных вод, 36.0% – упругая емкость гидротермального резервуара (в том числе 15.3% из “трещин” и 20.7% из матричного пространства) и 8.3% – реинжекция.

Прогнозное численное моделирование до 2032 г. при начальных параметрах добычных скважин на октябрь 2006 г. показывает возможность стабильного получения пара со средним расходом  $28.9 \text{ кг/с}$  (пароводяной смеси  $288.3 \text{ кг/с}$ ) при условии последовательного бурения и ввода в эксплуатацию пяти дополнительных скважин, оптимизации потерь давления от скважин до сепараторов, т.е. при используемой технологии эксплуатации возможно обеспечение пара для ГеоЭС  $6.8 \text{ МВт}$ , при использовании более эффективных технологий преобразования пара в электроэнергию – до  $11 \text{ МВт}$  (бинарные технологии или применение специализированных турбин). Дополнительные запасы могут быть получены также при направленном разбуривании зоны восходящего потока теплоносителя в фундаменте и изоляции резервуара от охлаждающего влияния инфильтрационных вод.

Опыт эксплуатации средне- и высокотемпературных геотермальных месторождений на западе США (провинция Бассейнов и Хребтов, кальдера Лонг Вэлли, Ист Меза), являющихся по многим показателям аналогами Паужетского, показыва-

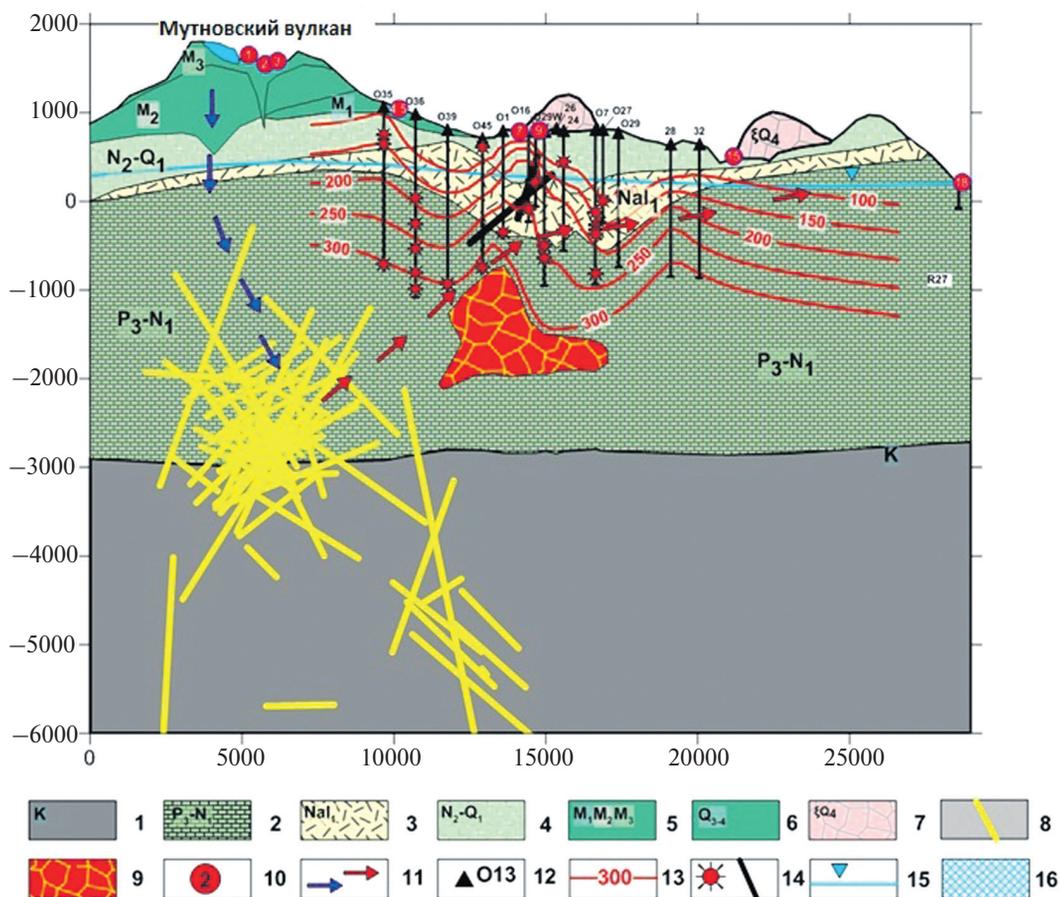
ет возможность существенного прорыва с доведением вырабатываемой мощности до  $40 \text{ МВт}$ , на Паужетском геотермальном месторождении при использовании бинарной технологии, полной реинжекции, отработанного теплоносителя и применении погружных высокотемпературных насосов (shaft downhole pumps) для обеспечения требуемого расхода циркуляции.

Больше-Банное геотермальное месторождение является аналогом Паужетского по следующим показателям: 1) температурам продуктивного резервуара, вскрытым скважинами  $170\text{--}200^\circ\text{C}$  (Паужетское) и  $160\text{--}172^\circ\text{C}$  (Больше-Банное); 2) суммарной продуктивности  $288 \text{ кг/с}$  паро-водяной смеси (Паужетское) и  $188 \text{ кг/с}$  паро-водяной смеси (Больше-Банное); 3) трещинно-блоковому типу продуктивного резервуара (Паужетский резервуар приурочен к артезианско-вулканогенному бассейну  $N_2\text{--}Q_1$  возраста, характеризующимся двойной пористостью, Больше-Баннский резервуар приурочен к артезианско-вулканогенному бассейну  $N$  возраста, также характеризующимся трещинной продуктивностью). Поэтому Больше-Банное месторождение может также достигнуть указанной выше электрической продукции. Оба указанных выше геотермальных месторождения могут быть использованы дополнительно для выработки тепловой энергии.

**Мутновское месторождение.** Месторождение обеспечивает введенные в эксплуатацию в декабре 1999 г. Верхне-Мутновскую ГеоЭС мощностью  $12 \text{ МВт}$ , и в 2001 г. – Мутновскую ГеоЭС-1 мощностью  $50 \text{ МВт}$ .

Месторождение расположено в пределах Северо-Мутновской гидротермальной системы, тесно связанной с действующим вулканом Мутновский (возраст 80 тыс. лет, массив из 4-х вулканических конусов), который обеспечивает тепловое и водное питание Северо-Мутновской гидротермальной системы (рис. 3).

Инъекции магмы в виде даек, связанные с Мутновским вулканом, фиксируются плоско-ориентированными кластерами микроземлетрясений (MEQ), большинство из которых происходит в Северо-Восточном секторе вулкана ( $2 \times 10 \text{ км}^2$ ) на глубине от  $-4$  до  $-2 \text{ км}$  абс., а некоторые магматические внедрения происходят на отметках от  $-6$  до  $-4 \text{ км}$  абс. в районе продуктивного геотермального резервуара. Водное питание продуктивных резервуаров происходит при таянии ледника Мутновского вулкана ( $1500 \text{ м}$  абс. до  $1800 \text{ м}$  абс.), что подтверждается данными изотопного состава ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) теплоносителя эксплуатационных скважин до начала эксплуатации. Дачный продуктивный резервуар с температурой  $260\text{--}310^\circ\text{C}$  и объемом  $16 \text{ км}^3$  находится на стыке разломов СВВ и СВ простираения, что совпадает с ориентацией



**Рис. 3.** Геологический разрез Северо-Мутновской гидротермальной системы.

1 – фундамент; 2 – миоценовые песчаники и третичные вулканогенно--осадочные отложения; 3 – миоценовые дацитовые и риолитовые туфы и лавы; 4 – плиоцен-четвертичные базальты и андезитовые туфы и лавы; 5 – Мутновский вулкан, включающий три вулканических конуса; 6 – верхнеплейстоценовые и голоценовые андезиты и базальты; 7 – верхне-плейстоценовые и голоценовые риолитовые экструзии; 8 – магматические инъекции (дайки) за 01.2009–06.2019 г.; 9 – диоритовая интрузия; 10 – термопроявления [Kiryukhin et al., 2018]; 11 – предполагаемые флюидные потоки (синие – холодные, красные – горячие); 12 – скважины на Мутновском месторождении (с соответствующими номерами); 13 – геоизотермы, °С; 14 – продуктивные зоны; 15 – пьезометрический уровень воды в геотермальном резервуаре; 16 – ледник Мутновского вулкана.

инъекций даек. По результатам TOUGH2 моделирования показано, что резервуар способен обеспечить устойчивую продукцию 65–83 МВт<sub>г</sub> до 2055 г., при бурении дополнительных скважин в ЮВ секторе месторождения. Более того, продукция резервуара может увеличиться до 87–105 МВт<sub>г</sub>, если применить бинарные технологии [Kiryukhin et al., 2018]. Моделирование также показывает, что прогнозные оценки чувствительны к величине притока локальных метеорных вод в процессе эксплуатации.

Концептуальное iTOUGH2-EOS1 термогидродинамическое моделирование Мутновской гидротермальной системы в целом объясняет ее формирование в течение 1500–5000 лет за счет теплового питания в результате инъекции даек через жерло вулкана Мутновского-4 и водного

питания за счет инфильтрации воды через жерла вулканов Мутновского-2 и Мутновского-3 (рис. 4). Результаты моделирования также указывают на существование скрытого геотермального резервуара с температурой 300°С, находящегося ниже Мутновского продуктивного геотермального резервуара на глубине от 4000 до 5000 м, который может быть целью для будущих исследований и эксплуатации.

*Оценка прогнозной электропроизводительности высокотемпературных гидротермальных систем по интенсивности вулканической активности*

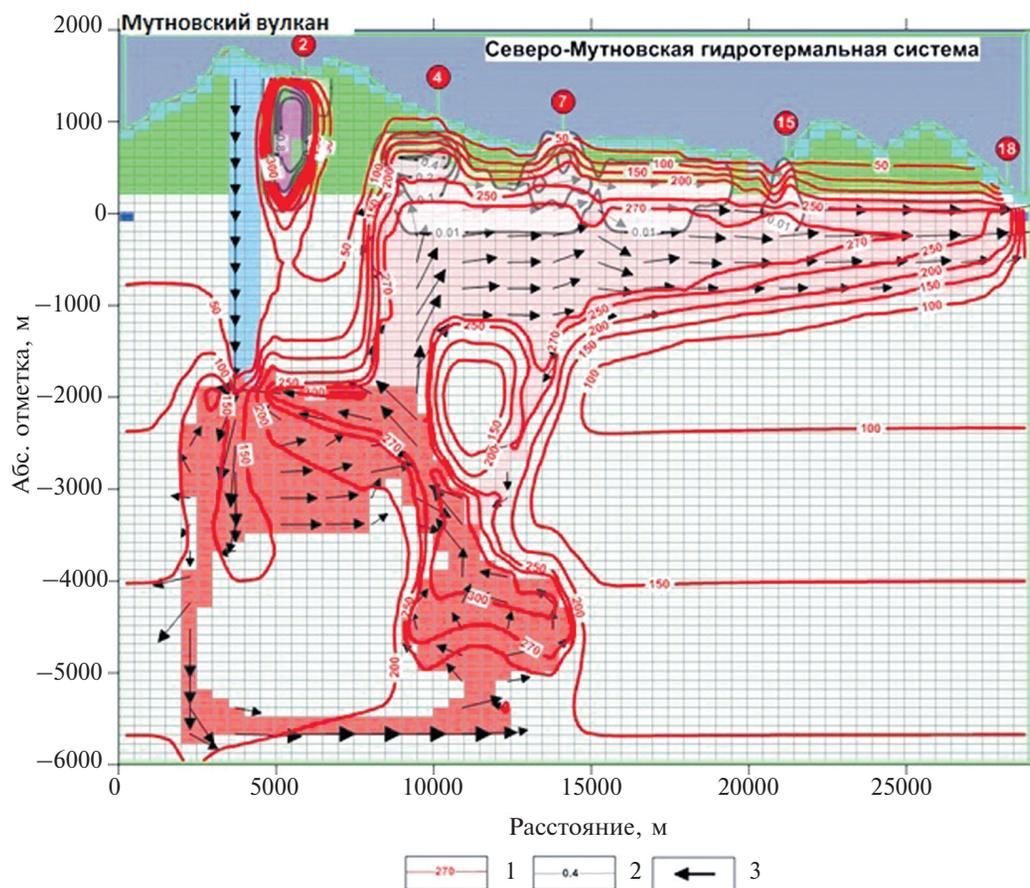
Соотношения между вулканической и гидротермальной деятельностью также могут быть использованы для прогноза электропроизводительности

гидротермальных систем. Анализ данных по восьми крупнейшим странам-производителям геотермальной электрической энергии (Исландия, США, Индонезия, Филиппины, Япония, Мексика, Новая Зеландия, Италия (Тоскана)) показывает, что существует статистически значимая линейная корреляция между количеством активных вулканов и прогнозными геотермальными ресурсами, обеспечивающими электропроизводительность гидротермальных систем [Stefansson, 2005], т.е. один активный вулкан способен (в среднем) сформировать прилегающую к нему гидротермальную систему с прогнозной электрической мощностью 158 МВт (с погрешностью  $\pm 13\%$ ). При этом вопрос о том, каким образом и где активные вулканы аккумулируют магму для генерации прилегающих к ним гидротермальных систем – остается открытым.

В связи с этим можно дополнительно отметить некоторые результаты исследований по проблеме формирования гидротермальных систем Камчатки, прилегающих к активным вулканам. Анализ локальной сейсмичности в пре-

делах Авачинско-Корякской группы вулканов в период 2000–2016 гг. позволяет выявить последовательность плоско-ориентированных кластеров землетрясений, интерпретируемых как процесс внедрения даек и силлов [Кирюхин и др., 2017]. Инъекции магмы идентифицируются в следующих зонах: 1) неглубокозалегающий коровый магматический очаг в юго-западной части Корякского вулкана, состоящий из комбинации даек и силлов, в диапазоне глубин от –2 до –5 км абс.; 2) зона аккумуляции даек в субмеридиональной зоне ( $7.5 \times 2.5$  км) в диапазоне глубин от –2 до –5 км абс.; 3) неглубокозалегающий магматический очаг в конусе Авачинского вулкана в диапазоне отметок от 1 до 2 км абс.

На Камчатке функционирует 29 активных вулканов: Камбальный, Кошелевский, Дикий Гребень, Ильинский, Желтовский, Ксудач, Ходутка, Опала, Мутновский, Горелый, Авачинский, Корякский, Жупановский, Карымский, М. Семячик, Тауншиц, Кихпиньч, Крашенинникова, Кроноцкий, Кизимен, Комарова,



**Рис. 4.** Профильная термогидродинамическая iTOUGH2-EOS1sc модель Северо-Мутновской гидротермальной системы, прилегающей к Мутновскому вулкану (естественное состояние, время моделирования – 5000 лет). 1 – температура; 2 – паронасыщенность; 3 – суммарные векторы массового потока с абсолютными значениями более  $10^{-5}$  кг/с  $m^2$ .

Примечание: цветом на рисунке показаны домены модели с различными материальными свойствами.

Гамчен, Толбачик, Ушковский, Ключевской, Шевелуч, Безымянный, Хангар, Ичинский. Тогда суммарная оценка прогнозной электропроизводительности прилегающих гидротермальных систем составит  $29 \times 158 = 4582$  МВт<sub>э</sub>. Исключая семь вулканов, входящих в состав Кроноцкого заповедника (Тауншиц, Кихпинич, Крашенинникова, Кроноцкий, Кизимен, Комарова, Гамчен), получим прогнозную электропроизводительность  $22 \times 158 = 3476$  МВт<sub>э</sub>. С учетом указанной выше погрешности, диапазон прогнозной электропроизводительности высокотемпературных гидротермальных систем Камчатки оценивается от 3024 до 3927 МВт<sub>э</sub>.

#### ПРОГНОЗНЫЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ТЕМПЕРАТУРОЙ В НЕДРАХ МЕНЕЕ 150°C

Крупные геотермальные месторождения с температурой в недрах менее 150°C являются участками гидротермальных систем. С ними связаны многочисленные термальные источники с температурой 20–95°C, местоположение основных групп которых отражено на рис. 1. Из-за относительно слабой изученности гидротермальных систем (с температурой в недрах менее 150°C) и, вероятно, их специфики, не удастся установить определенного соотношения между ресурсами и выносом тепла поверхностными термопроявлениями.

Подсчет прогнозных ресурсов таких гидротермальных систем производился по тепловой энергии, содержащейся в горных породах резервуара, объемы которого выбирались по аналогии с разведанными месторождениями с учетом характера распределения поверхностных термопроявлений, их мощности и особенностей геологической структуры по схеме, предложенной в работе [Assessment ..., 1979]. Глубина залегания кровли резервуаров принималась усредненной и равной 0.5 км, а высота равной 2.5 км. Средняя температура в резервуаре определялась по геохимическим геотермометрам и измерениям в скважинах. Неопределенность в оценке объема геотермального резервуара выражается погрешностью не менее 30%.

Исходные данные для оценки прогнозных ресурсов, перспективных для использования геотермальных месторождений с температурой менее 150°C, приведены в табл. 3. Их прогнозные ресурсы составляют 413 МВт<sub>э</sub>. Прогнозные геотермальные ресурсы известных месторождений и 43 гидротермальных систем в пределах четырех геотермальных провинций составляет около 1350 МВт<sub>э</sub> при предполагаемом столетнем использовании.

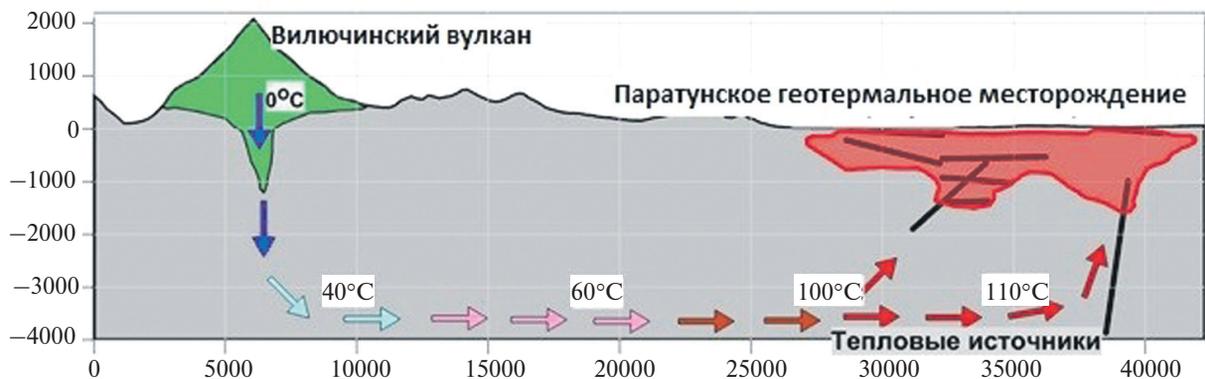
#### *Перспективы использования геотермальных месторождений с температурой резервуара менее 150°C*

Паратунские месторождения. Собственно Паратунское геотермальное месторождение находится в эксплуатации с 1964 г., преимущественно, в режиме самоизлива, суммарный отбор термальной воды, которая используется для локального теплоснабжения, бальнеологии и тепличного хозяйства п. Паратунка и п. Термальный (3 тыс. жителей) за период 1966–2014 гг. составил 321 млн т. Паратунские геотермальные месторождения приурочены к вулканогенным резервуарам в грабенах рек Паратунка и Карымшина, они являются примерами низкотемпературных гидротермальных систем с водным питанием метеорного происхождения (рис. 5, рис. 6) [Kiryukhin et al., 2017a]. Изотопный состав термальных вод ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) указывает на то, что область их водного питания включает структуру Вилочинского вулкана (2173 м абс.) и приподнятые участки кальдеры Леонова в верховьях р. Карымшина. Геомеханический анализ геометрии продуктивных зон Паратунского геотермального резервуара показывает наличие крутопадающих продуктивных разломов, характерных для гидроразрыва в условиях радиального растяжения (что может быть связано с тепловыми источниками магматического происхождения в основании резервуара и избыточным давлением при циркуляции с приподнятыми областями водного питания). Термогидродинамическое TOUGH2 моделирование естественного состояния и истории эксплуатации (включая изменения давления, температуры и концентрации хлор-иона, вызванные эксплуатацией) в период 1965–2014 гг. позволяет оценить суммарный приток глубинного теплоносителя (190 кг/с с энтальпией от 366 до 464 кДж/кг), фильтрационно-емкостные параметры резервуара - сжимаемость (до  $4 \times 10^{-8}$  Па<sup>-1</sup>) и проницаемость (до 1.4 Дарси). Моделирование подтвердило площадную разгрузку термальных вод из продуктивного резервуара в вышележащий горизонт грунтовых вод. Моделирование химической истории (Cl-иона) эксплуатации объясняет постепенное увеличение Cl-иона притоком хлоридных вод через восточную границу геотермального резервуара. Прогнозное моделирование длительной эксплуатации до 2040 г. с расходом 256 кг/с показывает незначительное понижение давления (0.7 бар) и незначительное падение температуры в продуктивном геотермальном резервуаре Паратунского геотермального месторождения. С использованием указанной выше термогидродинамической модели показана возможность устойчивой эксплуатации Паратунского геотермального резервуара с использованием погружных насосов при расходе отбора термальных вод до 1375 кг/с, при



**Рис. 5.** Паратунские геотермальные месторождения: продуктивные геотермальные резервуары и условия водного питания; на схеме также показана топографическая поверхность, разметка осей – 1 км.

1 – контуры продуктивных геотермальных резервуаров на абс. отм.  $-750$  м Паратунского (по изотерме  $75^{\circ}\text{C}$ ) и Верхне-Паратунского (по изотерме  $60^{\circ}\text{C}$ ); 2 – голоценовые лавовые потоки и шлаковые конусы; 3 – риолитовые экструзии (возраст 0.5–0.8 млн лет); 4 – области водного питания Паратунских геотермальных резервуаров (выделяются по топографической отметке выше 1000 м абс.); 5 – горизонтальные проекции водных потоков от областей водного питания к продуктивным геотермальным резервуарам; 6 – притоки хлоридных вод в процессе эксплуатации продуктивных резервуаров Паратунского геотермального месторождения; 7 – горячие источники; 8 – проекции продуктивных разломов на абс. отм.  $-750$  м; 9 – контуры кальдеры Леонова (возраст 1.2–1.5 млн лет).



**Рис. 6.** Условия водного и теплового питания продуктивных геотермальных резервуаров Нижнего и Северного участков Паратунского геотермального месторождения. Разрез построен от Вилючинского вулкана до Паратунского геотермального месторождения.

**Таблица 3.** Прогнозные геотермальные ресурсы изученных и предполагаемых геотермальных месторождений Камчатки (температура резервуара менее 150°C)

№ на рис. 1	Геотермальные месторождения	Максимальная температура источников, °С	Естественная тепловая нагрузка, МВт <sub>г</sub>	Площадь участка термопроявлений, км <sup>2</sup>	Объем резервуара, км <sup>3</sup>	Оцененная температура резервуара, °С	Тепловая энергия резервуара, 10 <sup>18</sup> Дж	Прогнозные геотермальные ресурсы, МВт <sub>г</sub>	Примечание
	Тымлатское	47.5	5.0	2.5 ±	3.7 ±	115	1.15 ±	20.8 ±	
	Паланское	95.0	7.5	6.5 ±	9.7 ±	105	2.75 ±	49.75 ±	Источники с температурой 30–95°C
2	Русаковское	76.5	57.8	10.0 ±	15.0 ±	90	3.64 ±	65.8 ±	Источники с температурой 36–76.5°C
3	Анавайское	52.0	7.4	1.5 ±	2.2 ±	115	0.68 ±	12.3 ±	
4	Эссовское	65.0	4.4	3.0 ±	4.5 ±	104	1.26 ±	22.8 ±	Эксплуатируется, теплоснабжение п. Эссо
5	Пушинское	46.0	1.5	2.5 ±	3.71.1	110	1.1 ±	19.9 ±	Вскрыто буровыми скважинами
6	Нальчевское	75.0	9.4	11.0 ±	16.5 ±	143*	6.37 ±	11.5 ±	
7	Малкинское	83.0	9.4	2.5 ±	3.7 ±	128*	1.28 ±	23.2 ±	Вскрыто буровыми скважинами
8	Пиначевское	12.5	0.8	1.50 ±	2.2 ±	95	0.56 ±	10.1 ±	Вскрыто буровыми скважинами
9	Начикинское	81.0	4.2	1.5 ±	2.2 ±	106*	0.63 ±	11.4 ±	Вскрыто буровыми скважинами
10	Южно-Бережное	20.0	0.2	2.0 ±	3.0 ±	90	0.73 ± 0.22	13.2 ±	Вскрыто буровыми скважинами
11	Паратунское	81.5	8.2	10.0 ±	15.0 ±	110	4.46 ±	80.6 ±	Эксплуатируется теплоснабжение жилищ
12	Верхне-Паратунское	70.5	20.6	9.0 ±	13.5 ±	110	4.01 ±	72.5 ±	Вскрыто буровыми скважинами

Примечание. Данные для подсчета прогнозных ресурсов представлены ПО “Камчатгеология”. Значения, отмеченные звездочками, из работы [Барabanов и др., 1979].

умеренном понижении давления (до 8 бар) и температуры (до 4°C) в резервуаре. Это обеспечивает теплотребление в системах централизованного теплоснабжения г. Петропавловск-Камчатский. В качестве дополнительных геотермальных источников выработки тепловой энергии могут быть использованы Верхне-Паратунское и Мутновское геотермальные месторождения.

Анализ экономической эффективности проекта эксплуатации Паратунского геотермального месторождения с погружными насосами, обеспечивающими добычу 1150 кг/с теплоносителя с начальной температурой 80°C и конечной температурой после использования 30°C, показывает, что срок окупаемости проекта при существующих ценах на тепловую энергию с учетом дисконтирования и инфляции составит 4.8 года [Кирюхин, Журавлев, 2019]. При этом добыча тепловой энергии для удаленных потребителей (г. Петропавловск-Камчатский, г. Елизово и г. Вилючинск) составит 1630 тыс. Гкал в год (216 МВт тепл.), что обеспечивает теплотребление в системах централизованного теплоснабжения Петропавловска-Камчатского.

Подключение к эксплуатации Верхне-Паратунского геотермального месторождения, являющегося аналогом Паратунского, и обладающего сопоставимыми запасами геотермальной энергии или применение тепловых насосов за счет электрической энергии, невостребованной в ночное время электрической мощности Мутновских ГеоЭС (50 МВт), — полностью решает проблему теплообеспечения основных потребителей Камчатки за счет геотермальных источников энергии. Заметим также, что централизованное теплоснабжение Петропавловска-Камчатского за счет Паратунского геотермального месторождения эквивалентно экономии углеводородного топлива для России в размере около 219.7 тыс. т в год (или 104.7 млн \$ в год).

## ПЕТРОГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

Геотермальные ресурсы, связанные с запасенным (аккумулятивным) теплом горных пород, рассматриваются как базовые ресурсы [Muffler, Cataldi, 1978] и в известной мере определяются величиной кондуктивного теплового потока [Diment et al., 1975]. Чтобы показать возможный масштаб геотермальной энергии, сделана оценка содержания тепла первого 10-километрового слоя [Сугробов, 1982]. Подсчет производился по объему горных пород в интервале глубин 1–10 км, средней температуре в слое, рассчитанной для стационарного режима по данным теплового потока, подобранного в соответствии с геологическим разрезом значения теплопроводности (2.5–2.7 Вт/м °С для вулканогенно-оса-

дочного слоя Камчатки) и теплоемкости горных пород (около 2.5 Дж/см<sup>3</sup>).

Обобщенные данные измерения теплового потока в глубоких скважинах Камчатки приведены в работе [Смирнов и др., 1991]. Тепло, аккумулярованное в первом километровом слое, не учтено, так как температура на его подошве составляет в обычных условиях приблизительно 30°C, т.е. соответствует наименьшей температуре воды, сбрасываемой после использования в основных системах теплоснабжения. Тепловая энергия, аккумулярованная горными породами, составляет 5.2 x 10<sup>23</sup> Дж.

## ТЕПЛО, АККУМУЛИРОВАННОЕ МАГМАТИЧЕСКИМИ ОЧАГАМИ

Тепло, аккумулярованное магматическими очагами, рассматривается нами в работе [Сугробов, 1982] вслед за [Smith, Shaw, 1975] как потенциальный геотермальный ресурс.

В настоящее время количественный подсчет их ресурсов в большей степени условен из-за плохой изученности проблемы извлечения тепла, аккумулярованного горячими породами. Можно только, ориентируясь на объемы магматических очагов (по геофизическим данным), оценить масштаб такого извлечения. Детально геофизическими методами изучен лишь промежуточный очаг Авачинского вулкана.

Оценка количества тепла в магматическом очаге Авачинского вулкана дана в работе [Федотов и др., 2007]. При эллиптической аппроксимации его формы [Федотов и др., 2007] составляет: для малого эллипсоида (с полуосями 1.53 и 2.3 км) при снижении температуры от 900 до 150°C—0.7·10<sup>20</sup> Дж для большого эллипсоида (с полуосями 3 и 4.5 км) при снижении температуры от 700 до 150°C равно 4.1·10<sup>20</sup> Дж

Предполагается, что неглубокозалегающие магматические очаги имеют вулканы Кошелевский, Ходутка, Опала, Ипелька, Горелый, Мутновский, Дзэндзур, Кизимен и другие, кальдера Ксудач. При подсчете ресурсов тепла других вулканов объемы магматических очагов принимались равными 10 км<sup>3</sup>, за исключением вулканического рифта вулкана Толбачик (30 км<sup>3</sup>). Минимальная величина ресурсов тепла магматических очагов Камчатки оценивается в  $n \times 10^{21}$  Дж.

## ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Понятия “геотермальные ресурсы”, “прогнозные геотермальные ресурсы” и связанные с ними понятия “эксплуатационных запасов категорий А, В и С1” чрезвычайно важны для принятия

экономических решений об использовании геотермальных месторождений для выработки электроэнергии и (или) теплообеспечения. В связи с этим отметим, что в последние годы предпринимаются попытки разработки унифицированной классификации энергетических ресурсов (нефть, газ, геотермальная энергия) (United Nations Framework Classification for Resources (UNFC)). В этой классификации действуют три категории оценки: E — экономическая целесообразность, F — техническая осуществимость, G — геологическая изученность. Каждая из указанных категорий имеет три основные градации, единицей измерения ресурса является Петаджоуль (электрический или тепловой). Петаджоуль равен  $10^{15}$  джоулей. Пример применения UNFC для Паужетского геотермального месторождения содержится в разделе Case Study 12 на сайте: [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC\\_GEO/1734615\\_E\\_ECE\\_ENERGY\\_110\\_WEB.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_GEO/1734615_E_ECE_ENERGY_110_WEB.pdf)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие использования геотермальных ресурсов на Камчатке возможно по двум основным направлениям: получению электрической энергии на высокотемпературных геотермальных месторождениях и теплообеспечения за счет использования низкотемпературных геотермальных месторождений. В настоящее время установленная электрическая мощность Мутновских ГеоЭС составляет 62 МВт<sub>э</sub> (при реальной выработке около 50 МВт<sub>э</sub>), установленная мощность Паужетской ГеоЭС 12 МВт<sub>э</sub> (при реальной выработке от 4 до 5 МВт<sub>э</sub>). Паратунское геотермальное месторождение используется для локального теплообеспечения с массовым расходом 254 кг/с (теплоотбор 53 МВт<sub>т</sub> при средневзвешенной температуре продуктивных скважин 80°C и температуре утилизации 30°C).

Геотермальные ресурсы Камчатки по прогнозной оценке достаточны для выработки электроэнергии мощностью от 680 до 1100 МВт (по объемному методу и по естественной тепловой разгрузке) и от 3000 до 3900 МВт (по интенсивности вулканической активности). Прогнозные геотермальные ресурсы для теплообеспечения оцениваются в 1350 МВт<sub>т</sub>.

Применение численного термогидродинамического TOUGH2-моделирования с прогнозом эксплуатации продуктивных геотермальных резервуаров с известными фильтрационно-емкостными и энергетическими свойствами показывает: 1) возможность увеличения электропроизводительности уже эксплуатирующихся участков Мутновского геотермального месторождения до 105 МВт, Паужетского геотермального месторождения до 11 МВт, в том числе

с использованием бинарных технологий; 2) возможность увеличения выработки тепловой энергии при эксплуатации Паратунского геотермального месторождения с погружными насосами до 216 МВт<sub>т</sub>, что обеспечивает теплопотребление в системах централизованного теплоснабжения города Петропавловск-Камчатский.

Дальнейшие перспективы увеличения геотермального электро- и теплоснабжения на Камчатке могут быть также связаны с разведкой частично разведанных Больше-Банного, Нижне-Кошелевского и Верхне-Паратунского геотермальных месторождений. Использование геотермальных ресурсов последних в энергетических целях в сочетании с наращиванием мощностей Мутновских ГеоЭС и Паужетской ГеоЭС решает проблему надежного и полного электроснабжения юга и центра Камчатской области за счет геотермальных источников энергии.

Использование данных детальных сейсмологических наблюдений в сочетании с термогидродинамическим TOUGH2-EOS1 моделированием позволило выявить на доступных для бурения глубинах скрытые геотермальные резервуары с гидротермальной циркуляцией, связанные с магматическими питающими системами вулканов Мутновский и Корякский. Эти резервуары также могут рассматриваться в качестве целей разведочно-эксплуатационного бурения для получения геотермальной энергии.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 18-05-00052-19.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барабанов Л.Н., Кирсанова Т.П., Пилипенко Г.Ф. и др.* Использование гидрохимических данных для изучения гидротермальных систем // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М.: Наука, 1979. С. 124–153.
- Вакин Е.А., Декусар З.Б., Сержников А.И., Спиценкова М.В.* Гидротермы Кошелевского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976а. С. 58–84.
- Вакин Е.А., Кирсанова И.Т., Кирсанова Т.П.* Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976б. С. 85–114.
- Кирсанова Т.П.* Гидротермы Киреунской долины в Срединном хребте Камчатки // Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания, 28–31 мая 1969 г. Львов, 1971. С. 239–246.

- Кирсанова Т.П., Мелекесцев И.В.* О происхождении и возрасте Ходуткинских терм // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 49–59.
- Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. и др.* Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.
- Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б.* Возможности использования Паратунского геотермального месторождения для теплообеспечения Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 21–33.
- Кононов В.И., Сугробов В.М.* Геотермальные ресурсы Камчатки, использование и перспективы развития. Тепловое поле Земли и методы его изучения // Сборник научных трудов. М.: Изд-во Российского университета Дружбы Народов, 1997. С. 11–16.
- Краевой Ю.А., Охупкин В.Г., Сережников А.И.* Результаты гидрогеологических и геотермических исследований Больше-Банной и Карымчинской гидротермальных систем // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 179–211.
- Пилипенко Г.Ф.* Гидротермы Карымского вулканического центра на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 85–101.
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М., Яновский Ф.А.* Земной тепловой поток Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 41–65.
- Сугробов В.М.* Геотермальные энергоресурсы Камчатки и перспективы их использования // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 267–281.
- Сугробов В.М.* Геотермальные ресурсы Курило-Камчатского региона // Энергетические ресурсы Тихоокеанского региона. М.: Наука, 1982. С. 93–107.
- Сугробов В.М., Кононов В.И., Постников А.И.* Прогнозные геотермальные ресурсы областей современного вулканизма Камчатки и Курильских островов: научные и прикладные аспекты // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма. Петропавловск-Камчатский: ОТТИСК, 2005. С. 9–24.
- Федотов С.А., Сугробов В.М., Уткин И.С., Уткина Л.И.* Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 32–46.
- Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Букатов Ю.Ю. и др.* Новые данные о строении зоны разгрузки геотерм в районе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 36–50.
- Assessment of geothermal resources of the United States – 1978 / Ed. L.J.P. Muffler // U.S. Geological Survey Circular. 1979. V. 790. 163 p.
- Diment W.H., Urban T.C., Sass J.H. et al.* Temperature and heat contents based on conductive transport of heat // Assessment of Geothermal Resources of the United States. U.S. Geological Survey Circular. 1975. V. 726. P. 84–103.
- Kiryukhin A.V., Yampolsky V.A.* Modeling Study of the Pauzhetsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia // Geothermics. 2004. V. 33. № 4. P. 421–441.
- Kiryukhin A.V., Asaulova N.P., Finsterle S.* Inverse modeling and forecasting for the exploitation of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia // Geothermics. 2008. V. 37. P. 540–562.
- Kiryukhin A.V., Vorozheikina L.A., Voronin P.O. et al.* Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia // Geothermics. 2017a. V. 70. P. 47–61.
- Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P. et al.* Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2017b. Article ID 4279652. 21 p.
- Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O., Kiryukhin P.A.* Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. V. 356. P. 36–55.
- Muffler L.J.P., Cataldi R.* Methods for regional assessment of geothermal resources // Geothermics. 1978. V. 7. P. 53–89.
- Smith R.L., Shaw H.R.* Igneous-related geothermal systems // Assessment of Geothermal Resources of the United States – 1975. U.S. Geological Survey Circular. 1975. V. 726. P. 58–83.
- Stefansson V.* World Geothermal Assessment // Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24–29 April. Antalya, 2005. P. 1–6.
- Sugrobov V.M.* Utilization of geothermal resources of Kamchatka, prognostic and future development // Proceedings the World Geothermal Congress. 1995. P. 1549–1554.

## GEOHERMAL RESOURCES OF KAMCHATKA AND THE NEAREST PROSPECTS OF THEIR DEVELOPMENT

**A.V. Kiryukhin\***, **V. M. Sugrobov\*\***

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,  
bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

*\*e-mail: avkiryukhin2@mail.ru*

*\*\*e-mail: sugrym@mail.ru*

Received April 26, 2019

The forecast geothermal resources of Kamchatka are sufficient to generate 3900 MW of electrical energy. The same resources for heat supply are estimated at a capacity of 1350 MWt (thermal). Thermohydrodynamic TOUGH2 modeling of exploitation of already identified productive hydrogeothermal reservoirs with installed energy properties allows us to predict: 1) the possibility of increasing the electrical performance of already operating areas of the Mutnovsky field up to 105 MW and the Pauzhetsky field up to 11 MW using binary technologies; 2) the possibility of increasing heat generation at the Paratunskoye field with submersible pumps up to 216 MWt, which will fully ensure the heat consumption of the district heating systems of Petropavlovsk-Kamchatsky.

**Key words:** geothermal resources, thermohydrodynamic modeling, TOUGH2, Kamchatka.