

Раздел 1: ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ И МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

ПРОГНОЗНЫЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ ОБЛАСТЕЙ СОВРЕМЕННОГО ВУЛКАНИЗМА КАМЧАТКИ И КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ: НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

Сугробов В.М.¹, Кононов В.И.², Постников А.И.³

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский*

² *Геологический Институт РАН, Москва, E-mail: kononov@ginras.ru*

³ *ЗАО «Наука», Москва, E-mail: postnikov@geotherm.ru*

Практически все высокотемпературные геотермальные месторождения, на базе которых работают ГеоЭС, сосредоточены в тектонически-мобильных поясах земной коры с проявлениями современного вулканизма. В России это Камчатка и Курильские острова. В настоящее время установленная здесь мощность ГеоЭС составляет 79 МВт, в том числе 73 МВт, на Камчатке. Прогнозная электрическая мощность на Камчатке оценивается в 550 МВт, по тепловой разгрузке и 1250 МВт, по тепловой энергии резервуаров и порядка 400 МВт, на Курильских островах. В области современного вулканизма России потребляется порядка 3100 ТДж/год геотермальных ресурсов прямого использования. На Камчатке прогнозная величина низкопотенциальных геотермальных ресурсов (1520 МВт) может обеспечить рост потребления геотермального тепла до 27 тыс. ТДж/год.

PROGNOSTIC GEOTHERMAL RESOURCES OF KAMCHATKA AND KURIL ISLANDS MODERN VOLCANISM AREAS: SCIENTIFIC AND PRACTICAL ASPECTS

Sugrobov V.M.¹, Kononov V.I.² and Postnikov A.I.³

¹ *Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky*

² *Geological Institute RAS, Moscow, E-mail: kononov@ginras.ru*

³ *“Science” joint-stock company, Moscow, E-mail: postnikov@geotherm.ru*

Most high-temperature geothermal fields used as a base for geothermal power plants are located in tectonically mobile belts of the earth crust characterized with recent volcanic activity. In Russia such area are Kamchatka Peninsula and Kuril Islands with the present installed capacity of GeoPPs of 73 MW and 6 MW respectively. Prognostic GeoPP capacity in Kamchatka is evaluated as 550 MW (according data on natural heat discharge) or 1250 MW (according to estimation of thermal energy in reservoirs) and up to 400 MW in Kuril Islands. The direct use of geothermal resources in region of recent volcanism in Russia amounts to 3100 TJ per year and can be increased up to $27 \cdot 10^3$ TJ per year in Kamchatka only.

1. Введение

В XX веке началось активное освоение глубинного тепла Земли. Практическое использование геотермальных ресурсов приняло промышленные масштабы во

многих странах, особенно в Италии, Исландии, Новой Зеландии, США, Филиппинах, Мексике, Японии и в последние годы в России. Предполагается, что в наступившем столетии доля геотермальных ресурсов в энергобалансе стран, обладающих ими, будет увеличиваться с большими темпами. За период с 2000 по 2005 годы (данные Всемирного Геотермального Конгресса 2005 г.) установленная мощность геотермальных электростанций возросла на 938 МВт и составила 8912 МВт (табл. 1). Выработка электроэнергии за счет указанной мощности составляет пока 0,4% мировой генерации электричества. К 2010 году ожидается увеличение доли вырабатываемой электроэнергии за счет геотермальных ресурсов до 1%. Значительно возросло прямое использование заключенного в геотермальных ресурсах тепла. Прирост тепловой мощности прямого использования достиг около 12,9% ежегодно при общей ее величине в 2004 году 27825 МВт_т. Уже 71 страна мира использует геотермальные ресурсы в различных системах теплоснабжения в сравнении с 58 в 2000 г. и 28 странами в 1995 г. Причем, на первое место выдвинулось использование геотермальных ресурсов для обеспечения работы тепловых насосов (33%). По-прежнему большая доля падает на купание и плавательные бассейны (29%) и обогрев помещений (20%). Практически все высокотемпературные геотермальные месторождения, на базе которых работают ГеоЭС, сосредоточены в тектонически-мобильных поясах земной коры с проявлениями современного вулканизма. В России это Камчатка и Курильские острова. В настоящее время установленная мощность ГеоЭС в этом регионе составляет 79 МВт, в том числе 73 МВт на Камчатке. Прогнозная электрическая мощность на Камчатке оценивается в 550 МВт, по тепловой разгрузке и 1250 МВт, по тепловой энергии резервуаров и порядка 400 МВт, на Курильских островах. В области современного вулканизма России потребляется порядка 3100 ТДж/год геотермальных ресурсов прямого использования, что составляет почти 50% используемых ресурсов страны. Между тем только на Камчатке прогнозная величина низкопотенциальных геотермальных ресурсов (1520 МВт) может обеспечить рост потребления геотермального тепла до 27 тыс. ТДж/год.

Очевидно, что дальнейшее развитие использования тепла Земли, в том числе в вулканических областях России, будет определяться успехами в выявлении и реалистичных оценках геотермальных ресурсов.

Таблица 1. Установленная генерирующая мощность геотермальных электростанций мира [20, 21].

СТРАНА	1990	1995	2000	2005	2005-2000 увеличение	% увеличения
Австралия	0	0.2	0.2	0.2	0	Неизменный
Австрия	0	0	0	1	1	Первый ввод
Германия	0	0	0	0.2	0.2	Первый ввод
Гватемала	0	0	33	33	0	Неизменный
Индонезия	144.75	310	590	797	297	35
Исландия	44.6	50	170	202	32	19
Италия	545	632	785	790	5	1
Кения	45	45	45	127	82	182
Китай	19.2	29	29	28	-1	Неизменный
Коста-Рика	0	55	143	163	20	14
Мексика	700	753	755	953	198	16
Никарагуа	35	35	70	77	7	10
Новая Зеландия	283.2	286	437	435	-5	Неизменный
Папуа Новая Гвинея	0	0	0	6	6	Первый ввод
Португалия (Азорские о-ва)	3	5	16	16	0	Неизменный
Россия	11	11	23	79	56	244
Сальвадор	95	105	161	151	-10	Неизменный
США	2774.6	2817	2228	2544	316	3
Таиланд	0.3	0.3	0.3	0.3	0	Неизменный
Турция	20.6	20	20	20	0	Неизменный
Филиппины	891	1227	1909	1931	22	1
Франция	4.2	4	4	15	11	275
Эфиопия	0	0	7	7	0	Неизменный
Япония	214.6	414	547	535	-12	Неизменный
Всего	5831.72	6797	7974	8912	938	12

2. Геотермальные ресурсы

В вулканических районах проявляются все возможные виды выделения тепловой энергии Земли: кондуктивный тепловой поток, извержение вулканов, формирование магматических очагов, вынос геотермального флюида (циркуляция и разгрузка термальных вод и пара). Соответственно в этих районах обнаруживаются все виды геотермальных ресурсов, которые представляют собой тепло, заключенное в недрах и содержащееся в горных породах и термальных водах, нагретых кондуктивным и конвективным тепловым потоком.

I. Геотермальные ресурсы, связанные с извлечением тепла, аккумулированного горными породами, или петрогеотермальные ресурсы по определению Ю.Д. Дядькина и др. [8]:

- 1) естественные ресурсы тепла, аккумулированного горными породами под воздействием регионального теплового потока;
- 2) естественные ресурсы тепла пород промежуточных магматических очагов.

II. Геотермальные ресурсы термальных вод и пара отдельных гидрогеологических структур:

- 1) естественные и эксплуатационные запасы термальных вод и пара гидротермальных систем;
- 2) естественные и эксплуатационные запасы термальных вод гидрогеологических структур, формирующихся за счет кондуктивного теплового потока.

2.1. Геотермальные ресурсы тепла, аккумулированного горными породами

Геотермальные ресурсы, связанные с запасенным (аккумулированным) теплом горных пород и основанные на кондуктивном тепловом потоке определяются как базовые геотермальные ресурсы [24]. В областях активного вулканизма региональная их оценка имеет, очевидно, самый общий интерес, так как существующие здесь мощные термоаномалии (гидротермальные системы и магматические очаги) обладая громадным потенциалом, могут обеспечить широкое развитие геотермальных электростанций и систем геотермального теплоснабжения. Чтобы показать возможный масштаб геотермальной энергии, ранее была сделана оценка для Камчатки содержания тепла первого 10-километрового слоя [16]. 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-осадочного слоя Камчатки) и теплоемкости горных пород (около 2,5 Дж/см³). Величина теплового потока взята из работы [15], отметившей следующее распределение кондуктивного фонового теплового потока из консолидированного фундамента: высокие и повышенные значения потока в пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса (95 мВт/м²) и Срединного выступа (83 мВт/м²), пониженные значения (57-63 мВт/м²) в пределах структурно-тектонических элементов Западной и Восточной Камчатки и Корякско-Авачинской депрессии.

Тепло, аккумулированное в первом километровом слое, не учтено, так как температура на его подошве составляет в обычных условиях приблизительно 30°С, т.е. соответствует наименьшей температуре воды, сбрасываемой после использования в основных системах теплоснабжения. Тепловая энергия, аккумулированная горными породами, составляет огромную величину:

$5,2 \times 10^{23}$ Дж.

2.2. Геотермальная энергия неглубокозалегающих магматических очагов

В вулканических областях большие перспективы связаны с использованием тепла, заключенного в породах магматических очагов, в том числе периферических очагов действующих вулканов. Магматические очаги обладают громадным энергетическим потенциалом, определяемым (по геофизическим и петрологическим данным) высокой температурой (600-1000°С) и большим объемом нагретых пород. С точки зрения возможного извлечения тепловой энергии интерес могут представлять очаги, залегающие на глубинах доступной буровой технике, то есть в интервале 3-7 км. Естественные ресурсы тепла магматических очагов сейчас можно оценить приближенно, основываясь преимущественно на геологических исследованиях действующих вулканов и молодых кальдер. На Камчатке геофизическими методами первым был обнаружен магматический очаг под Авачинским вулканом [19].

Влияние обнаруженного периферического магматического очага на геотемпературное поле приочаговой зоны впервые было оценено аналитическим расчетом Б.Г. Поляком [14]. Было показано, что для стационарного варианта тепловой поток не будет фактически отличаться от фонового на расстоянии 15 км от центральной оси очага. Использование промежуточного очага Авачинского вулкана для извлечения тепла предложил В.В. Аверьев (1964-1967 гг.), обосновавший

необходимость бурения глубокой скважины в приочаговую зону для изучения геотермических условий и разработки схемы извлечения тепловой энергии. Позднее, опираясь на результаты комплексных геофизических исследований, включающих наземную магнитную съемку, аэромагнитную съемку, гравиметрические съемки и сейсморазведочные работы в различной модификации предложение В.В. Аверьева было конкретизировано в докладе Института вулканологии [22]. Приблизительный масштаб возможного извлечения ресурсов тепла можно представить по объему магматического очага и его температуре. Глубина залегания верхней кромки очага по сейсмическим данным - 1,5 км от уровня моря, по гравиметрическим данным центр тяжести аномальных масс залегает на глубине 4 км. Размеры очага по данным сейсморазведки определяются в плоскости фундамента и оцениваются радиусом $5,2 \pm 0,9$ км. При этом наиболее "разогретая" часть очага оценивается радиусом 3,6 км. Гравиметрия дает размеры аномальной зоны при плотности пород очага 2,85-3,1 г/см³ - 5,2 x 2,6 км. Физические параметры вещества очага оцениваются по прохождению сейсмических волн (скорость продольных волн - 2200 м/сек, вязкость пород - 10^5 - 10^8 пуаз). Объем магматического очага Авачинского вулкана можно оценить в 150-300 км³. Если считать выделение тепла в $2,4 \cdot 10^{18}$ Дж/км³ при снижении температуры от 850 до 300°C [25], при всем объеме магматического очага Авачинского вулкана ресурсы тепла составят $3,6$ - $7,2 \cdot 10^{20}$ Дж. По геологическим данным предполагается, что неглубокозалегающие магматические очаги имеют вулканы Кошелевский, Ходутка, Опала, Ипелька, Горелый, Мутновский, Малый Семячик, Дзэндзур, Кизимен и другие, кальдера Ксудач, Узон, вулканический рифт вулкана Толбачик. Радиус промежуточных очагов в среднем вряд ли превышает 2 км [18]. Соответственно, объемы магматических очагов названных вулканов и кальдер можно определить примерно в 25 км³. Тогда минимальные ресурсы тепла магматических очагов Камчатки можно оценить величиной порядка $1,5 \cdot 10^{21}$ Дж.

Можно предполагать по аналогии с камчатскими вулканами существование на Курильских островах субповерхностных магматических очагов вулканов и кальдер, характеризующихся кислым и средним составом лав. Мы выделили только вулканы на крупных островах гряды; Эбеко, Карпинского (о. Парамушир); Берга (о. Уруп); Баранского, Ивана Грозного (о. Итуруп); Менделеева (о. Кунашир), кальдеры Тао-Русир (о. Онекотан); Заварицкого (о. Симушир); Головнина (о. Кунашир). Если ориентироваться на параметры магматических очагов, принятых нами для вулканов Камчатки, то ресурсы тепла магматических очагов названных

вулканов и кальдер Курильских островов составят около $5 \cdot 10^{20}$ Дж.

2.3. Геотермальные ресурсы гидротермальных систем

Гидротермальные конвективные системы разделяются условно на высокотемпературные (температура в недрах более 150°C) и гидротермальные системы с температурой в недрах менее 150°C . Геотермальные ресурсы высокотемпературных гидротермальных систем, обеспеченные запасами термальных вод и пара и теплом, аккумулированном обводненными породами вызывают наибольший интерес, так как используются или могут быть использованы в различных теплоэнергетических установках не только для получения тепла, но и выработки электроэнергии.

На Камчатке все известные крупные гидротермальные системы и термопроявления расположены в Восточно-Камчатском и Центрально-Камчатском вулканических поясах. Около 150 групп термальных источников, характеризующихся различными температурами и химическим составом воды, в том числе 11 высокотемпературных гидротермальных систем, объединены в четыре геотермальные провинции (**рис. 1**). Выделение их базируется на особенностях геолого-структурных и гидрогеологических условий. На Курильских островах, несмотря на существование многочисленных термальных источников и парогазовых струй, четко охарактеризованы высокотемпературные гидротермальные системы и месторождения: Менделеева-Горячий Пляж (о. Кунашир), вулкана Баранского (о. Итуруп), Северо-Парамуширская (Северо-Курильское м-ние) на о. Парамушир.

2.3.1. Высокотемпературные гидротермальные системы

При оценке прогнозных геотермальных ресурсов нами применялось два основных способа:

- по величине естественной тепловой разгрузки (выносу тепла поверхностными термопроявлениями);
- по данным определения тепловой энергии, содержащейся в горных породах, насыщенных флюидом и распространенных в пределах гидротермальных систем [26].

Первая оценка основывается на допущении, что естественная тепловая разгрузка, определяемая по сумме выноса тепла поверхностными термопроявлениями, отождествляется с минимальными геотермальными ресурсами, увеличение которых возможно при вскрытии глубоких горизонтов скважинами в

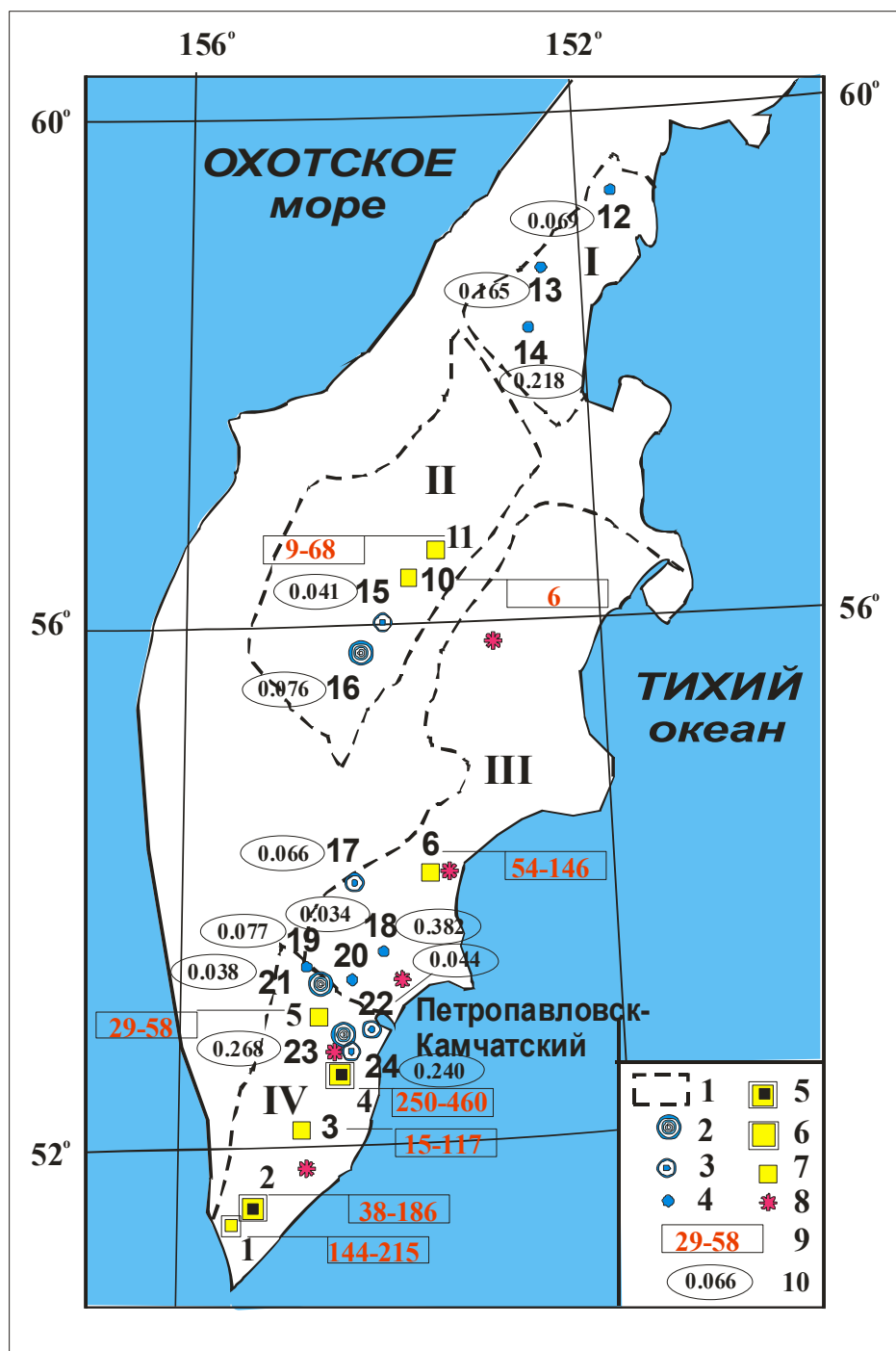


Рис. 1. Карта расположения геотермальных месторождений Камчатки, эксплуатирующихся и рекомендуемых для поисково-разведочных работ (см. табл. 2, 3).

1 – геотермальные провинции: I - Северо-Камчатская; II - Центрально-Камчатская; III - Восточно-Камчатская; IV - Южно-Камчатская; 2-4 – низкотемпературные геотермальные месторождения (температура в недрах менее 150°C): 2 – эксплуатирующиеся; 3 – разведанные; 4 – перспективные для разведки; 5-7 – высокотемпературные месторождения: 5 – эксплуатирующиеся; 6 – разведанные; 7 – перспективные для разведки (цифры у знаков 2-7 соответствуют номерам месторождений в таблицах 1,3); 8 – вулканы и кальдеры с неглубокозалегающими магматическими очагами; 9 – прогнозируемая мощность ГеоЭС (МВт_г); 10 – прогнозируемая величина извлекаемого тепла по тепловой энергии резервуара (10¹⁸ Дж).

процессе разведки и эксплуатации месторождений. Коэффициент такого увеличения, определенный по сопоставлению полученных эксплуатационных запасов геотермальных месторождений и оценок мощности тепловой разгрузки гидротерм, изменялся от 3 до 7. В большинстве случаев его значение принималось равным 4. Например, при расчете прогнозных ресурсов Паужетской гидротермальной системы, ее тепловая мощность по сумме выноса тепла естественными термопроявлениями была определена в 104 МВт_т. Увеличивая эту величину в четыре раза и, вводя коэффициент перехода в полезную работу тепловой энергии на устье скважин (0,23), перевода ее в электрическую энергию (0,4), получим прогнозную электрическую мощность - 38 МВт_э.

Величины потенциала электрической энергии таким же образом были подсчитаны для других высокотемпературных систем Камчатки. Прогнозные геотермальные ресурсы высокотемпературных гидротермальных систем, исключая Гейзерную, Семячикскую и Узонскую, расположенных в Кроноцком заповеднике, эквивалентны 550 МВт электрической мощности (**табл. 2**). При подсчете ресурсов таким способом предполагалось, что геотермальные ресурсы используются в течение 30-100 лет без существенного изменения качества теплоносителя. Для этих же систем сделана оценка другим способом по расчету тепловой энергии, содержащейся в горных породах резервуара, насыщенных флюидом [24]. Оценка ресурсов по этому методу требует определения объема блока, слоя или резервуара нагретых горных пород, температуру и удельное теплосодержание горных пород. 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. Поэтому объем резервуара оценивался по его площади, определение которой во многих случаях не было однозначным. На Камчатке площадь определялась по распространению поверхностных термопроявлений, геологическому строению участка и особенностям гидрогеологических условий. Неопределенность оценки площади выражается погрешностью не менее 30%. 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 и двухфазных. Для приближенных расчетов термальной энергии в резервуаре температура принималась средней, одинаковой, для всех горячеводных систем - 200°C и пародоминирующих или двухфазных систем - 220°C.

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

№№ на рисунке	Гидротермальные системы и месторождения	Естественная тепловая разгрузка (МВт _г)	Площадь распространения термопроявлений (км ²)	Объем резервуара, (км ³)	Средняя температура резервуара (максимальная в скважинах)* (°С)	Тепловая энергия резервуара (10 ¹⁸ Дж)	Прогнозная электрическая мощность, (МВт _э)	
							По тепловой энергии резервуара	По тепловой разгрузке
Камчатка								
1	Кошелёвская	314 ¹⁾	15±4,5	37,5±11,2	220	22,27±6,7	215±64	144
	Нижне-Кошелёвское	104 ¹⁾	7±2,1	17,5±5,2	220 (240)*	10,39±3,11	100±30	48
2	Паужетская	104 ²⁾	18±5,4	45±13,5	200 (220)*	25,78±7,73	186±56	38
	Паужетское	62,8 ³⁾	7±2,1	17,5±5,2	200(218)*	9,45±2,83	68±20	20
3	Ходуткинская	42 ⁴⁾	12,0±3,6	30±9	200	16,2±4,8	117±35	15
4	Мутновская	546 ⁵⁾	32±9,6	80±24	220	47,52±14,2	460±138	251
	Северо-Мутновское	129 ⁵⁾	12±3,6	30±9	220(301)*	17,82±5,3	172±52	59
5	Больше-Банная	79 ⁶⁾	6±1,8	15±4,5	200(171)*	8,1±2,43	58±17	29
6	Карымская	146 ⁷⁾	15±4,5	37,5±11,2	200	20,25±6,1	146±44	54
10	Апальская	16 ⁸⁾	-	-	200	-	-	6
11	Киреунская	24,5 ⁸⁾	7±2,1	17,5±5,2	200	9,45±2,83	68±20	9
Курильские острова								
	¹⁰⁾ Северо-Курильское	60 ⁹⁾	10±3	25±7,5	200	13,5±4	97,6±29,3	16,5
	Океанское (о. Итуруп)	-	12,0±3,6	30±9	200	16,2±4,8	117±35	-
	Менделеева-Горячий Пляж (о.Кунашир)	-	9±2,7	22,5±6,75	200	12,2±3,6	90±27	-

Примечание. Данные по тепловой разгрузке: 1) - Е.А. Вакин и др.[7]; 2) - В.М. Сугробов [16]; 3) – В.В. Аверьев [1]; 4) - Т.П. Кирсанова, И.В. Мелекесцев [10]; 5) - Е.А. Вакин и др. [6]; 6) -Ю.А. Краевой и др. [12]; 7) - Г.Ф. Пилипенко [13]; 8) -Т.П. Кирсанова [9]; 9) – Л.Н. Барабанов [4]; 10) – В.И. Белоусов и др. [5].

Удельная теплоемкость пород, насыщенных водой и паром и представленных, главным образом, вулканитами и вулканогенно-осадочными породами, принималась равной $2,7 \text{ Дж/см}^3\text{°C}$ [23]. Из этой же работы взята величина отношения тепловой энергии резервуара к полезной работе 0,057 и 0,061, соответственно для резервуаров со средней температурой 200 и 220°С. Коэффициент электрического использования для горячеводных систем равен 0,4 и для пародоминирующих - 0,5. Примеры расчета геотермальных ресурсов для отдельных гидротермальных систем Камчатки даны в работах [11, 17, 26].

Основанные на вышеуказанном подходе данные подсчета прогнозных ресурсов высокотемпературных систем приведены в таблице 2. Они без учета гидротермальных систем Семячической, Узонской и Гейзерной, расположенных в Кроноцком заповеднике, эквивалентны электрической энергии порядка 1250 МВт за 100 лет. Как видно, величины прогнозной мощности геотермальных электростанций, рассчитанных по естественной тепловой мощности систем, имеют тот же порядок.

На Камчатке четыре системы разведаны и обеспечивают работу ГеоЭС. На базе Паужетского месторождения функционирует с 1967 г. Паужетская ГеоЭС, установленная мощность которой составляет 11 МВт_э. На двух участках Мутновского месторождения работают Верхне-Мутновская и Мутновская ГеоЭС с установленной мощностью соответственно 12 и 50 МВт_э. Эксплуатационные запасы Больше-Банного и Нижнее-Кошелевского геотермальных месторождений эквивалентны соответственно 6 МВт_э и 90 МВт_э (расчетн.).

На Курильских островах прогнозные геотермальные ресурсы определены по тепловой энергии резервуаров для трех исследованных, в том числе с помощью разведочного бурения, месторождений. Прогнозные ресурсы Северо-Курильского (о.Парамушир) эквивалентны мощности ГеоЭС 97 МВт, Океанского (о. Итуруп) – 117 МВт. Месторождение Менделеева-Горячий Пляж может обеспечить работу ГеоЭС мощностью около 90МВт. Общая величина прогнозных ресурсов Курильских островов с учетом гидротермальных систем о. Симушира и других оценивается в 400 МВт_э.

2.3.2. Гидротермальные системы и геотермальные месторождения с температурой ниже 150°С

В пределах четырех геотермальных провинций Камчатки выделены 43 гидротермальные системы, показателями существования которых являются соответствующие термальные источники или их группы с температурой 20—80° С.

Перспективными считаются 13 месторождений с учетом их расположения и энергетического потенциала – Тымлатское, Паланское, Русаковское, Анавгайское, Эссовское, Пущинское, Налычевское, Малкинское, Пиначевское, Начикинское, Южно-Бережное, Паратунское, Верхне-Паратунское (см. рис 1). Подсчет прогнозных ресурсов 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. 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. Извлекаемая тепловая энергия рассчитывалась по схеме в работе [23]. Полезное тепло, показанных на рисунке месторождений, достигает $1,72 \times 10^{18}$ Дж, что при столетнем использовании составляет 545 МВт (тепловых). Величина извлекаемого (полезного) тепла других систем и месторождений составляет $3,07 \times 10^{18}$ Дж, что при предполагаемом столетнем использовании составляет 975 МВт (тепловых). Общие геотермальные ресурсы месторождений с температурой менее 150°C оцениваются таким образом в 1520 МВт тепла. Исследованы с помощью разведочного бурения с оценкой эксплуатационных запасов 9 месторождений (**табл. 3**). Приведенные данные свидетельствуют о том, что тепловая мощность оцененных по результатам разведочного бурения запасов теплоносителя сопоставимы с расчетами их прогнозных ресурсов.

3. Заключение

Выполненная оценка геотермальных ресурсов Камчатки и Курильских островов более обоснована применительно к ресурсам высокотемпературных гидротермальных систем, являющихся источником получения электроэнергии. В данной работе подсчет прогнозных ресурсов гидротермальных конвективных систем опирается в основном на объемный метод [24]. Тепловая энергия резервуаров высокотемпературных систем Камчатки ($150 \cdot 10^{18}$ Дж) без Семячической, Узонской и Гейзерной, расположенных в Кроноцком заповеднике, могут обеспечить работу геотермальных станций порядка 1250 МВт, в течение 100 лет, а на Курильских островах – порядка 400 МВт. Подсчитанные по данным естественной тепловой

разгрузки геотермальные ресурсы высокотемпературных систем Камчатки, эквивалентны 550 МВт электрической мощности. Имеющиеся неоднозначные данные по естественной тепловой разгрузке гидротермальных систем Курильских островов (320 МВт) позволяют оценить их прогнозные ресурсы этим способом в 116 МВт_г. Прогнозные ресурсы гидротермальных систем и месторождений с температурой резервуара менее 150°C подсчитаны только для Камчатки и составляют около $4,8 \cdot 10^{18}$ Дж (полезное тепло), что при столетнем предполагаемом использовании составит 1520 МВт тепловых.

Таблица 3. Геотермальные ресурсы месторождений с температурой резервуара ниже 150°C

№ на рис.	Месторождение	Эксплуатационные запасы (м ³ /сут)	Температура на устье скважин (°C)	**Тепловая мощность запасов МВт _г)	*** Прогнозная мощность (МВт _г)
15	Анавгайское	3370	76	6,7	13
16	Эссовское	20735	75	40,2	24
17	Пушинское	2850	63	3,9	21
19	Малкинское	2420*	80	5,3	24
21	Начикинское	1175	73	2,2	12
21а	Кеткинское	1729	60	2,1	-
22	Южно-Бережное	900	72	1,6	14
23	Паратунское	23300	75	45,2	85
24	Верхне-Паратунское	21600	80	47,1	76

* Сумма дебитов скважин

** При отборе тепла относительно 35°C

*** По используемой тепловой энергии резервуара и работе в течение 100 лет

Теплоэнергетические параметры и газогидрохимический состав теплоносителя высокотемпературных гидротерм гидротермальных систем и геотермальных месторождений определялись по измерениям в скважинах или в большинстве случаев по состоянию поверхностных термопроявлений, газовым и геохимическим геотермометрам и по аналогии с известными месторождениями [17, 26].

Следует подчеркнуть, что оцененные геотермальные ресурсы гидротермальных систем отвечают лишь порядку величины, так как слабая изученность, в основном наземными исследованиями, не позволила точно определить основные характеристики геотермальных резервуаров. Полученные

величины прогнозных ресурсов, однако, показывают возможный масштаб использования геотермальной энергии, на который можно ориентироваться при постановке разведочного и эксплуатационного бурения.

В будущем возможно использовать огромный энергетический потенциал магматических очагов вулканов Камчатки и Курильских островов, который оценивается сейчас величиной порядка $1,5 \cdot 10^{21}$ Дж и $5 \cdot 10^{20}$ Дж соответственно. Оценка всех видов геотермальных ресурсов Камчатки и Курильских островов представлена в табл. 4.

Таблица 4. Прогнозные геотермальные ресурсы Камчатки и Курильских островов

Локализация геотермальных ресурсов	Тепловая энергия (10^{18} Дж)	Используемое (полезное) тепло (10^{18} Дж)	Электрическая мощность (МВт _т)		Примечание
			По тепловой энергии резервуара	По тепловой разгрузке	
Камчатка					
Горные породы первого 10-километрового слоя	520 000	-	-		
Магматические очаги	1500	-	-		
Высокотемпературные гидротермальные системы и геотермальные месторождения с температурой в недрах выше 150° С (см. табл. 2)	150	-	1250	550	Естественная тепловая разгрузка 1780 МВт _т
Гидротермальные системы и месторождения (температура в недрах до 150° С)	79,7	4,8	-		
В том числе наиболее перспективные для освоения (см. табл. 3)	28,6	1,72	-		Естественная тепловая разгрузка 137 МВт _т
Курильские острова					
Магматические очаги	500	-	-		
Высокотемпературные гидротермальные системы	-	-	400	-	Естественная тепловая разгрузка 320 МВт _т
В том числе месторождения Северо-Курильское, Океанское, Горячий Пляж	41,9	-	304	-	[4]

Геотермальные ресурсы Камчатки и Курильских островов представляют собой практически неисчерпаемый (постоянно возобновляемый) и, в отличие от ископаемого топлива, экологически чистый источник энергии. На Камчатке,

Курильских островах и других районах современного вулканизма зафиксированы и в той или иной мере оценены ресурсы практически всех систем и месторождений, выявленных по развитию поверхностной гидротермальной активности. В то же время масштабы использования глубинного тепла Земли здесь постоянно растут, особенно для выработки электроэнергии. Дальнейшие успехи в использовании геотермальной энергии будут во многом определяться результатами выявления новых геотермальных месторождений, точной оценкой, в том числе прогнозных, ресурсов и освоением тепла горных пород. В частности, на первый план на Камчатке выдвигается изучение и использование тепловой энергии магматического очага Авачинского вулкана.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ 05-05-64021а и 03-05-64044а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аверьев В.В.** Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки. Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1961, вып. 19.
2. **Аверьев В.В., Вакин Е.А., Поляк Б.Г.** Перспективы использования подземного тепла вулканических областей. В кн.: Геотермические исследования и использование тепла Земли. М.: Наука, 1966, с. 273-279.
3. **Аверьев В.В., Вакин Е.А.** Термальные поля вулканического массива Большой Семячик // Бюлл. вулканол. ст., N 42, 1966, с. 3-16.
4. **Барабанов Л.Н.** Гидротермы Курильской вулканической области. Отчет. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии РАН, 1976, 460 с.
5. **Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М.** Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: геологическое строение, концептуальная модель, геотермальные ресурсы // Вулканология и сейсмология. 2002, №1. с. 34-50.
6. **Вакин Е.А., Декусарз.Б., Серезжников А.И., Спиченкова М.В.** Гидротермы Кошелевского вулканического массива. В кн.: Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976, с. 58-84.
7. **Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П.** Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района. В кн.: Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976, с. 85-114.
8. **Дядькин Ю. Д., Соловьева Е. А., Парийский Ю. М. и др.** Принципы прогнозной оценки петрогеотермальных ресурсов. В кн.: Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М.: Наука, 1979, с. 5—15.
9. **Кирсанова Т.П.** Гидротермы Киреунской долины в Срединном хребте Камчатки. В кн. Вулканизм и глубины Земли. М., Наука, 1971, с. 239-246.
10. **Кирсанова Т.П., Мелекесцев И.В.** О происхождении и возрасте Ходуткинских терм // Вулканология и сейсмология. №.5, 1984, с. 49-59.
11. **Кононов В.И., Сугробов В.М.** Геотермальные ресурсы Камчатки, использование и перспективы развития. Тепловое поле Земли и методы его изучения. Сб-к научных трудов. М., Изд-во Российского университета Дружбы Народов, 1997. С. 11-16.
12. **Краевой Ю.А., Охалкин В.Г., Серезжников А.И.** Результаты гидрогеологических и геотермических исследований Большие-Банной и Карымчинской гидротермальных систем. В кн. "Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки". Владивосток, 1976, с. 179-211.
13. **Пилипенко Г.Ф.** Гидротермы Карымского вулканического центра на Камчатке // Вулканология и сейсмология. №.6, 1989, с. 85-101.
14. **Поляк Б.Г.** О характере геотемпературного поля в районе Авачинского вулкана // Докл. АН СССР, 1964, т.154, №2.

15. **Смирнов Я.Б., Сугробов В.М., Яновский Ф.А.** *Земной тепловой поток Камчатки // Вулканоология и сейсмология. 1991. №2. С. 41-65.*
16. **Сугробов В.М.** *Геотермальные ресурсы Курило-Камчатского региона. В кн. «Энергетические ресурсы Тихоокеанского региона». М.: Наука, 1982. С. 93-107.*
17. **В.М. Сугробов, В.И. Кононов, О.Б. Верейна.** *Перспективы использования геотермальных ресурсов Камчатки. Труды Международного геотермального семинара. Петропавловск-Камчатский, 2004, с. 9-14.*
18. **Федотов С. А.** *О входных температурах магм, образовании, размерах и эволюции магматических очагов вулканов // Вулканол. и сейсмол., 1980, № 4, с. 3—29.*
19. **Штейнберг Г.С., Зубин М.И.** *О глубине залегания магматического очага под Авачинским вулканом. Докл. АН СССР, 1963, т.152, №4.*
20. **Bertani R.** *World Geothermal Generation 2001-2005: State of the Art. Proceedings World Geothermal Congress 2005.*
21. **Huttrer G.W.,** *The status of World Geothermal Power Generation 1995-2000. Proceeding the World Geothermal Congress, 2000, pp 23-37.*
22. **Fedotov S.A., Balesta S.T., Droznin V.A., Masurenkov Yu.P., Sugrobov V.M.** *On a Possibility of Heat Utilization of the Avachinsky volcanic Chamber. Proceedings Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. 1976. P. 363-369*
23. **Muffler L.J.P. (Ed.).** *Assessment of Geothermal Resources of the United States, 1978. Geol. Surv. Circs., 1979, 790, 163 p.*
24. **Muffler L.J.P. and Cataldi.** *Methods for regional assessment of geothermal resources. Geothermics, 1978, 7, 2-4, 53-89.*
25. **Smith R.L. and Shaw H.R.** *Igneous-related geothermal systems. In: D.E. White and D.L. Williams (Eds.), Assessment of Geothermal Resources of the United States - 1975. Geol. Surv. Circs., 1975, 726, 58-83.*
26. **Sugrobov V.M.** *Utilization of geothermal resources of Kamchatka, prognostic and future development.// Proceeding the World Geothermal Congress, 1995, p. 1549-1554.*