

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ КАМЧАТКИ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА

Камчатка, как и другие области современного вулканизма, характеризуется напряженным тепловым режимом, что выражается в активной вулканической и гидротермальной деятельности и повышенном кондуктивном тепловом потоке. В субповерхностных условиях здесь проявляются соответственно все возможные формы тепловой энергии в виде извержений вулканов, формирования магматических очагов, циркуляции и разгрузки термальных вод и пара, кондуктивного теплового потока.

Геотермальные ресурсы, очевидно, представляют собой тепло, заключенное в недрах и содержащееся в горных породах и термальных водах, нагретых кондуктивным тепловым потоком, в породах промежуточных магматических очагов, в породах, термальных водах и паре термоаномалий гидротермальных конвективных систем.

Количественно геотермальные ресурсы выражаются по аналогии с ресурсами полезных ископаемых запасами тепла, содержащимися в массе горных пород или термальных вод конкретных участков геологических структур, которые разделяются на естественные или геологические и эксплуатационные запасы.

Сейчас практически используются только термальные воды и пар и в связи с этим производится оценка их эксплуатационных запасов. Тепло, содержащееся в повсеместно распространенных горных породах, в том числе "сухих", а также тепло пород магматических очагов правильнее отнести к геотермальным ресурсам, так как в настоящее время речь может идти только об оценке естественных запасов тепла.

Предлагается следующая схема классификации геотермальных ресурсов Камчатки (вулканических областей).

Геотермальные ресурсы — это все естественные запасы тепла, содержащиеся в породах и водах недр Камчатки с температурой выше 30°C до глубины 10 км, практически доступные извлечению (глубина 10 км дает разумную на сегодняшний день предельную границу извлечения тепла Земли).

I. Геотермальные ресурсы, связанные с извлечением тепла, аккумулированного горными породами (запасенное тепло):

- 1) естественные ресурсы тепла, аккумулированного горными породами под воздействием регионального теплового потока;
- 2) естественные ресурсы тепла пород гидротермальных систем;
- 3) 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, формирующиеся за счет кондуктивного теплового потока.

Естественные запасы тепла, содержащиеся в 10-километровом слое горных пород, Д. Уайт и Д. Уильямс (Assessment..., 1975) выделяют как базовые или исходные ресурсы, которые включают, в сущности, прочие категории ресурсов.

Методика подсчета запасов тепла горных пород проста и сводится к оценке температур на выбранных интервалах глубин, изучению или подбору значения теплоемкости и определению объема пород в том или ином регионе. В связи со слабой изученностью теплового режима недр Камчатки, представляется целесообразным на первых порах, сделать приближенную оценку запасов тепла по двум интервалам глубин: от 0 до 5 км и от 5 до 10 км. Поскольку прямых измерений температуры на указанных глубинах не имеется, температуру можно определить по величине теплового потока.

Расчет температуры производился по известному уравнению для стационарного поля (одномерная модель):

$$T = T_0 (q - 0,5A_0 \Delta Z) \Delta Z / K,$$

где T_0 и T — температура на кровле и подошве слоя; ΔZ — мощность слоя; A_0 — генерация радиогенного тепла; K — теплопроводность слоя; q — тепловой поток через кровлю.

Генерация радиогенного тепла оценена по данным определений урана, тория и калия в разновозрастных породах Камчатки (Леонова, Удадьцова, 1970; Дучков и др., 1972). Величина ее оказалась низкой в соответствии с относительно малыми концентрациями радиоактивных элементов. Для расчета температуры нами принята величина генерации тепла равная $2 \cdot 10^{-13}$ кал/см³ в предположении ее постоянства в выбранных интервалах глубин.

Теплопроводность изменяется, естественно, для различного типа пород. Для приближенных расчетов взята теплопроводность, характеризующая изверженные горные породы от основного до среднего состава, метаморфизованные вулканогенные породы, кристаллические сланцы и др., которые слагают "гранитный" слой земной коры. Средняя теплопроводность слоя — $6 \cdot 10^{-3}$ кал/см·с·град. Исключение сделано для первого 5-километрового слоя Западной Камчатки и 10-километрового слоя Восточной Камчатки, сложенных туфоогенно-осадочными породами со средней теплопроводностью $5 \cdot 10^{-3}$ кал/см·с·град.

Современные данные по тепловому потоку (Смирнов и др., 1974) позволили выделить лишь четыре зоны, соответствующие основным тектоническим зонам Камчатки (рисунок). Западная Камчатка, являющаяся частью мезозойской Камчатско-Корякской геосинклинальной зоны, охарактеризована четырьмя значениями фонового теплового потока при средней величине $1,3$ мккал/см²·с. Рассчитанная по приведенной выше формуле температура в недрах на глубинах 5 и 10 км достигает соответственно 125 и 200°С.

В Центрально-Камчатском вулканическом поясе фоновый тепловой

поток определен по девяти измерениям в пределах Начикинской складчато-глыбовой зоны и составляет в среднем $1,5 \text{ мккал/см}^2 \cdot \text{с}$. Эта величина распространена нами на всю площадь пояса из-за отсутствия других достоверных измерений. Рассчитанная температура на глубине 5 и 10 км достигает соответственно 120 и 235°C . Наиболее высокие значения фонового теплового потока получены для срединного массива Центральной Камчатки, тепловое поле которого можно считать стационарным. Нестационарный источник тепла прекратил свое действие где-то в плейстоцене. Естественно, здесь по расчету получаются и самые высокие температуры (на глубинах 5 и 10 км соответственно 180 и 350°C).

В Восточной Камчатке, которая представляет собой в тектоническом отношении кайнозойскую геосинклиналь с вулканическим поясом, наложившимся на нее в плейстоцене, зафиксированы минимальные значения фонового теплового потока, изменяющегося от $0,8$ до $1,2 \text{ мккал/см}^2 \cdot \text{с}$. Зону характеризует среднее его значение, равное $1,0 \text{ мккал/см}^2 \cdot \text{с}$. Пониженные значения связаны с нестационарностью теплового потока, поэтому рассчитанные температуры по уравнению для стационарного поля дают явно заниженные оценки. На глубине 5 и 10 км они равны соответственно 95 и 180°C .

Данные подсчета естественных ресурсов тепла, аккумулярованного горными породами в региональном тепловом поле, приведены в табл. 1. Ресурсы тепла первого километрового слоя не учтены, так как температура на его подошве достигает в обычных условиях 30°C . Значение теплоемкости горных пород соответствует общепринятому для наших условий и равно $0,6 \text{ кал/см}^3 \cdot \text{град}$. Общая величина ресурсов тепла, показанная в табл. 1, составляет $12,4 \cdot 10^{22} \text{ кал}$.

Естественные ресурсы тепла, аккумулярованного породами гидротермальных конвективных систем, подсчитываются в целом так же, как и предыдущая категория ресурсов. Отличие состоит в том, что средняя

Схема распределения зон теплового потока, гидротермальных систем и магматических очагов на Камчатке

1 — Гидротермальные системы (цифра указывает номер в табл. 1): а — низкотемпературные, температура на глубине 1 км 100°C и менее, температура поверхностных проявлений менее 100°C ; б — высокотемпературные, температура на глубине 1 км 150°C и более, на поверхности обычно кипящие источники, насыщенный или перегретый пар; 2 — геотермальные районы: А — Паужетский, Б — Мутновский; В — Паратунский; Г — Семьячкский; Д — Киреунский; 3 — вулканы и кальдеры (предположительно с неглубокими магматическими очагами — глубина кровли до 7–8 км): 1 — Кошелевский; 2 — Камбальский; 3 — Дикий Гребень; 4 — Ильинский; 5 — Желтовский; 6 — кальдера Ксудац; 7 — Ходуткинский; 8 — Горелый; 9 — Авачинский; 10 — Дзэндзур; 11 — Купол; 12 — Опала; 13 — кальдера вулкана Карымского; 14 — Малый Семьячик; 15 — Таушиц; 16 — Кихпинич; 17 — Большой Семьячик; 18 — Крашенинникова; 19 — Хангар; 20 — Кизимен; 21 — вулканический рифт Толбачика; 22 — Безымянный; 23 — Шивелуч; 4 — зона теплового потока: I — Западная Камчатка (Корякско-Камчатская мезозойская геосинклинальная зона), средний тепловой поток — $1,3 \text{ мккал/см}^2 \cdot \text{с}$; II — Центрально-Камчатский вулканический пояс, средний тепловой поток — $1,5 \text{ мккал/см}^2 \cdot \text{с}$; III — Центральная Камчатка (срединный массив), средний тепловой поток — $2,2 \text{ мккал/см}^2 \cdot \text{с}$; IV — Восточно-Камчатская геосинклинальная зона, средний тепловой поток — $1,0 \text{ мккал/см}^2 \cdot \text{с}$.

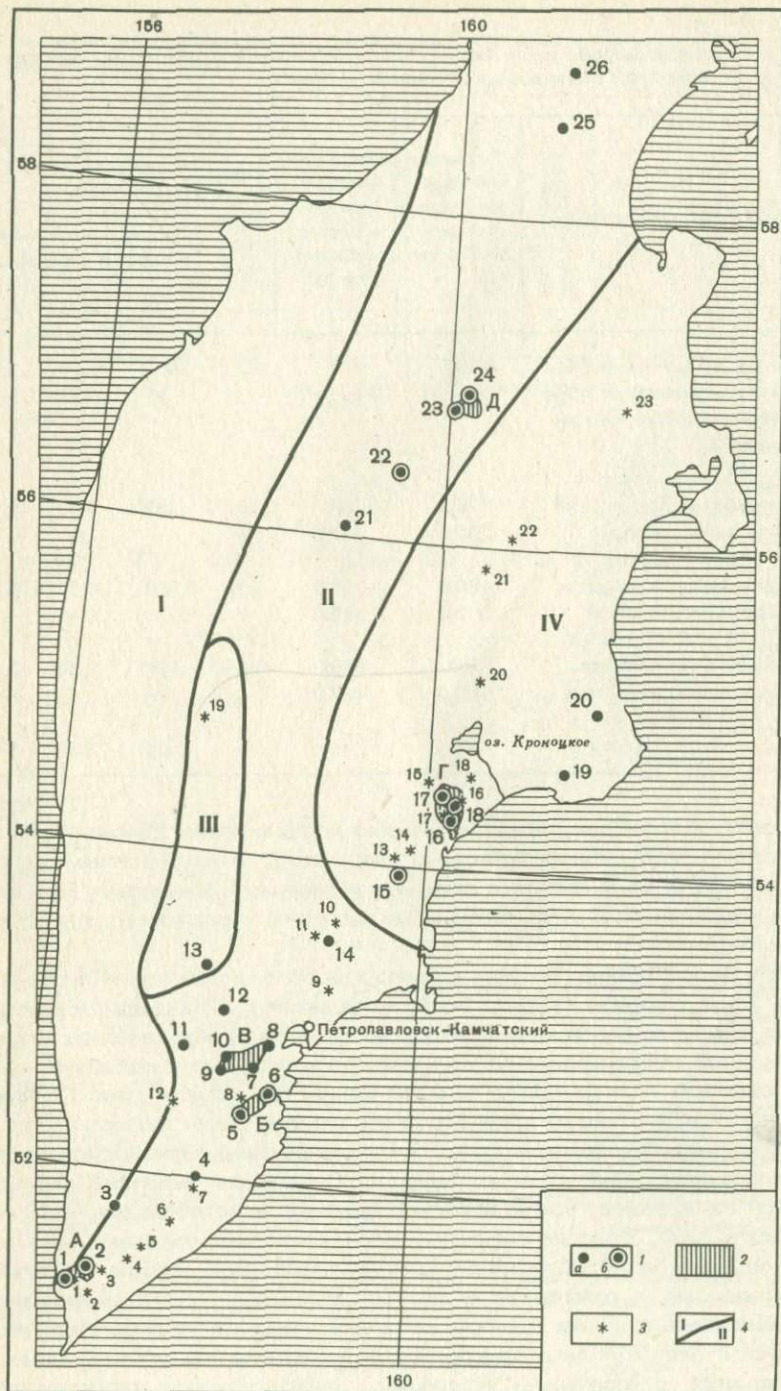


Таблица 1

Естественные ресурсы тепла Камчатки, аккумулированного горными породами под воздействием регионального теплового потока

Зона теплового потока	Рассчитанная температура на глубине 5 и 10 км, °С	Средняя температура в 4-х и 10-километровом слое, °С	Площадь зоны, тыс. км ²	Ресурсы тепла, аккумулированного горными породами, 10 ²² кал		
				В слое 1—5 км	В слое 5—10 км	В слое 1—10 км
I Западная Камчатка (Корякско-Камчатская мезозойская геосинклинальная зона)	125,0	77,5	67,0	0,76	2,66	3,42
	200,0	162,5	—	—	—	—
II Центрально-Камчатский вулканический пояс	120,0	75,0	100,0	1,08	4,41	5,49
	235,0	177,0	—	—	—	—
III Центральная Камчатка (Срединный массив)	180,0	105,0	9,9	0,18	0,70	0,88
	350,0	265,0	—	—	—	—
IV Восточно-Камчатская геосинклинальная зона	95,0	62,5	65,0	0,51	2,10	2,61
	180,0	137,0	—	—	—	—
Итого	—	—	—	2,53	9,87	12,40

4961

температура в недрах определяется обычно по фактическим измерениям и экстраполяции субповерхностных температур, по химическому составу источников и по аналогии с детально изученными объектами. При подсчете ресурсов тепла гидротермальных систем мы исходили из следующих положений.

За нижнюю границу нагретых пород для всех систем принималась глубина 3 км (базовая глубина по Г. Бодварссону). Площадь распространения нагретых пород определялась по развитию поверхностных термопроявлений для исследованных систем и по аналогии для слабоизученных. Теплоемкость горных пород принята равной 0,6 кал/см³·град. Содержание тепла подсчитано из предположения полного съема тепловой энергии при снижении температуры до 30°С. Основные данные для расчета и величина ресурсов приведены в табл. 2. Суммарная величина ресурсов 2,3·10¹⁹ кал, скорее всего, занижена. Дело в том, что большая часть названных в табл. 2 систем изучена на основе геологической съемки без проведения бурения. Приближенная оценка их ресурсов дана по аналогии с разбуренными, к сожалению не самыми мощными, системами Камчатки. Для Камчатки в целом ресурсы тепла этого вида могут быть увеличены, так как в табл. 2 учтены только изученные системы или системы, характеризующиеся относительно мощными поверхностными термопроявлениями.

Таблица 2

Естественные ресурсы тепла, аккумулированного горными породами гидротермальных систем Камчатки

Номер по схеме	Гидротермальная система	Прогнозная средняя температура, °С	Глубина залегания слоя нагретых пород, км	Площадь распространения, км ²	Мощность, км	Объем, км ³	Тепловая энергия, аккумулированная горными породами, 10 ¹⁸ кал	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Кошелевская	250	0,5	5,0	2,5	12,5	1,650	На поверхности перегретый пар с температурой 155 °С. Максимальная температура в скважинах 253°С на глубине 1200 м
2	Паужетская	220	0,5	5,0	2,5	12,5	1,50	На поверхности кипящие источники, насыщенный пар. Максимальная температура в скважинах 218°С
3	Гольгинская	100	1,0	2,0	2,0	4,0	0,20	На поверхности источники с температурой 74°С
4	Ходуткинская	200	1,0	3,0	2,0	6,0	0,65	То же, 88°С
5	Северо-Мутновская	250	0,5	5,0	2,5	12,5	1,65	На поверхности насыщенный и слегка перегретый пар
6	Жировская	200	1,0	3,0	2,0	6,0	0,65	На поверхности кипящие источники
7	Верхнепаратунская	100	1,0	3,0	2,0	6,0	0,29	На поверхности источники с температурой 70—79°С. Максимальная температура в скважинах 106°С
8	Паратунская	100	1,0	4,0	2,0	8,0	0,38	На поверхности источники с температурой 81,5°С. Максимальная температура в скважинах 106°С
9	Карымчинская	200	1,0	3,0	2,0	6,0	0,65	На поверхности источники с температурой 70,5—95°С,
10	Большебанная	200	1,0	5,0	2,0	10,0	1,08	На поверхности кипящие источники, максимальная температура в скважинах 171°С

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	Апачинская	100	1,0	1,0	2,0	2,0	0,10	На поверхности источники с температурой 71°C. Температура в скважине 73°C на глубине 487 м
12	Начикинская	100	1,0	1,0	2,0	2,0	0,10	На поверхности источники с температурой 30,5°C
13	Малкинская	100	1,0	2,0	2,0	4,0	0,20	На поверхности источники с температурой 82°C. Температура в скважинах 85°C на глубине 500 м
14	Налачевская	100	1,0	3,0	2,0	6,0	0,29	На поверхности источники с температурой 38–75°C. Максимальная температура в скважинах 75°C
15	Академии наук	220	1,0	2,0	2,0	4,0	0,48	На поверхности кипящие источники
16	Семячинская	250	0,5	5,0	2,5	12,5	1,65	На поверхности насыщенный и перегретый пар, температура 97–140°C; территория Кроноцкого государственного заповедника
17	Кальдера Узон	250	0,5	12,0	2,5	30,0	4,0	На поверхности кипящие источники, насыщенный пар; территория Кроноцкого государственного заповедника
18	Долина Гейзеров	250	0,5	10,0	2,5	25,0	3,3	На поверхности кипящие источники, гейзеры, перегретый пар с температурой 110°C; территория Кроноцкого государственного заповедника
19	Тюшевская	100	1,0	2,0	2,0	4,0	0,20	На поверхности источники с температурой 64°C
20	Чажминская	100	1,0	2,0	2,0	4,0	0,20	То же, 55–72°C
21	Эссовская	100	1,0	3,0	2,0	6,0	0,29	" 55°C
22	Апальская	200	1,0	2,0	2,0	4,0	0,38	Температура в скважинах 77°C
23	Киреунская	200	0,5	5,0	2,5	12,5	1,35	На поверхности кипящие источники

Таблица 2 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	Двухюр- точная	200	1,0	3,0	2,0	6,0	0,65	То же
25	Русаков- ская	100	1,0	3,0	2,0	6,0	0,29	На поверхности ис- точники с температу- рой 80°C
26	Паланская	100	1,0	2,0	2,0	4,0	0,20	То же, 95°C
	Итого						22,4	

Оценка естественных ресурсов тепла магматических очагов дана весьма приближенно и основана преимущественно на геологических исследованиях действующих вулканов и молодых кальдер. Из показанных на рисунке магматических очагов, залегающих на глубине до 10 км (а именно такие объекты интересуют нас с точки зрения возможного извлечения тепловой энергии), детально геофизическими методами изучен лишь промежуточный очаг Авачинского вулкана, что позволило поставить вопрос об извлечении тепла и дать прогнозную оценку ресурсов тепла (Аверьев и др., 1966; Fedotov et al., 1975).

Несмотря на весьма слабую изученность глубинного строения вулканов и кальдер, не позволяющую более определенно судить о наличии магматических камер, о глубине их залегания, размерах, а в некоторых случаях и вероятных температурах, нам представляется правильным оценить уже сейчас приближенно тепловую энергию очагов, учитывая их огромный потенциал. Например, Д. Пэк (Assessment..., 1975), основываясь на геологических и геофизических данных, оценивает тепловую энергию расплавленных магматических тел кислого состава (17 тел), промежуточного состава (24 тела) и одного базальтового тела на территории США величиной $2,5 \cdot 10^{22}$ кал. Хотя здесь же он высказывает сомнение в возможности извлечения этих ресурсов сейчас и вообще.

Чтобы представить приблизительно масштаб этих ресурсов на п-ове Камчатка, мы выбрали действующие вулканы с кислым или промежуточным составом лав, а также молодые четвертичные кальдеры Камчатки. Существование магматических очагов различных размеров под последними на различных глубинах показывают в своей работе М.И. Зубин и др. (1971) на основании анализа аномальной силы тяжести в редукции Буге. Авторы статьи оценивают в 5–6 км глубину верхней границы аномалеобразующих объектов для кальдер Карымского вулкана, Большого Семьячика, для Паужетской аномалии. Площадь аномалий различна, а в некоторых случаях (Узонская аномалия) достигает 50x40 км. Для приближенных расчетов нами взяты для предполагаемых очагов площадь 10 км² и мощность 2 км, за исключением достаточно изученного очага Авачинского вулкана, объем которого достигает 50 км³. Средняя температура в очагах принималась равной 600°C, а выделение тепла при снижении температуры до 300°C равным $0,387 \cdot 10^{18}$ кал/км³. Тогда ресурсы тепла 21-го выделенного очага (кислого и промежуточного состава)

составляют $21 \times 20 \times 0,387 = 162,5 \cdot 10^{18}$ кал. К этой величине следует прибавить ресурсы тепла Авачинского вулкана $19,3 \cdot 10^{18}$ кал и предположительно выделенный дайковый комплекс вулканического рифта вулкана Толбачик с объемом 30 км^3 , что составит $11,6 \cdot 10^{18}$ кал. Суммируя и округляя, получаем минимальную, на наш взгляд, величину ресурсов тепла магматических очагов Камчатки — $200 \cdot 10^{18}$ кал.

Естественные запасы высокотемпературных гидротермальных систем Камчатки подсчитаны на основе определения тепловой мощности, которая оценивается по сумме выноса тепла различными формами поверхностной гидротермальной активности. Прогнозная оценка запасов термальных вод и пара дается с учетом коэффициента увеличения мощности, равного трем, который определен на основе сопоставления эксплуатационных запасов и тепловой мощности естественной разгрузки для хорошо изученной Паужетской гидротермальной системы (Сугробов, 1976). Прогнозные запасы систем, подсчитанные таким образом, по нашему мнению, отвечают реальным минимальным эксплуатационным запасам геотермальных месторождений и составляют величину $0,98 \cdot 10^9$ кал/с. Прогнозная величина запасов термальных вод низкотемпературных систем (температура источников на поверхности менее 100°C) составляет $1 \cdot 10^8$ кал/с. Для отдельных геотермальных месторождений подсчитаны эксплуатационные запасы гидротерм. В целом они подтверждают их прогнозную оценку.

Естественные и эксплуатационные запасы термальных вод гидрогеологических структур, формирующихся под воздействием кондуктивного теплового потока, на Камчатке изучены слабо и в данной работе, учитывая их небольшой энергетический потенциал, нами не рассматриваются. Изложенные выше данные по подсчету естественных геотермальных ресурсов различных видов показывают, что региональные ресурсы, связанные с теплом, аккумулированным в повсеместно распространенных горных породах, на несколько порядков превышают прочие виды геотермальных ресурсов и составляют $12 \cdot 10^{22}$ кал. На втором месте стоят геотермальные ресурсы магматических очагов ($2 \cdot 10^{20}$ кал) и, наконец, ресурсы тепла нагретых пород гидротермальных систем ($2,3 \cdot 10^{19}$ кал). Вместе с тем высокие параметры природного или искусственного теплоносителя, который можно получить при извлечении тепловой энергии магматических очагов и гидротермальных систем, относительная приближенность их к земной поверхности, выдвигают эти объекты на первый план в качестве источника теплоэнергоснабжения. В табл. 3 приведены величины электрической энергии оцененных геотермальных ресурсов и эквивалентная им величина условного органического топлива, подсчитанные при выбранном коэффициенте извлечения тепловой энергии 10%. Последний, по всей вероятности, превышает реальные возможности извлечения тепловой энергии, но при отсутствии опыта такого извлечения приемлем для ориентировочных расчетов. Тем более что в данной работе в большинстве случаев занижены геометрические размеры очагов, гидротермальных систем и температура в их недрах.

Конечно цифры, приведенные в табл. 3, безусловно имеют умозрительный характер. Однако на данной стадии геотермической изученности территории и вообще проблемы извлечения "запасенного" тепла, скрупулез-

Таблица 3

Тепловая и электрическая энергия геотермальных ресурсов Камчатки

Вид ресурсов	Тепловая энергия, $1 \cdot 10^{18}$ кал	Электрическая энергия, МВт	Эквивалент органического топлива $1 \cdot 10^6$ т условного топлива
Тепло, аккумулированное горными породами в 10-километровом слое	120 000,0	—	17 000 000,0
Тепло магматических очагов	200,0	2656,0*	2850,0*
Тепло горных пород гидротермальных систем	26,0	3054,0*	328,0*
Природный теплоноситель гидротермальных систем	—	500,0	53,0

* Подсчитано при коэффициенте извлекаемости тепловой энергии 10%.

ные оценки вряд ли необходимы. Важно показать масштаб возможного использования нового источника энергии. Что касается гидротермальных систем и магматических очагов, освоение ресурсов которых началось уже сейчас, можно привести более реальную цифру электрической энергии и экономии органического топлива, если считать, что тепло извлекается при понижении температуры на 50°C , и принятом коэффициенте извлечения 0,1. Магматические очаги обеспечили бы электрическую мощность 6640 мвт-столетий и заменили бы 712,5 млн. т. условного топлива. Соответствующие цифры для тепла горных пород гидротермальных систем были бы — 760 мвт-столетий и 82,0 млн. т. условного топлива.

Литература

- 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.
- Дучков А.Д., Кренделев Ф.П., Пузанков Ю.М., Бобров В.А.* Роль радиогенного тепла в общем тепловом потоке земной коры Камчатки. — Докл. АН СССР, 1972, т. 207, № 2.
- Зубин М.И., Мелекесцев И.В., Таракановский А.А., Эрлих Э.Н.* Четвертичные кальдеры Камчатки. — В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971, с. 55—66.
- Леонова Л.А., Удальцова М.П.* U, Th, Li, Rb и Cs в вулканических породах Курильских островов и Камчатки. — Геохимия, 1970, № 11, с. 1329—1334.
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М., Сугрובה, Н.Г.* Тепловой поток, гидротермальная активность и динамика развития глубинных зон областей кайнозойского вулканизма. — В кн.: Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский, 1974, с. 175—196.
- Сугробов В.М.* Геотермальные энергоресурсы Камчатки и перспективы их использования. — В кн.: Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976, с. 267—281.
- Assessment of Geothermal Resources of the United States. Geological Survey, Circular 726, 1975.
- 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. — Proceeding 2nd United Nations Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources, 1975.