

ДИНАМИКА РОСТА И РАЗВИТИЯ ПРОТОЧНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ОЧАГОВ МУТНОВСКО - ГОРЕЛОВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ, ИХ ТЕПЛОВЫЕ ПОЛЯ И НАКОПЛЕННОЕ ИМИ ПОДЗЕМНОЕ ТЕПЛО

Федотов С. А., Делемень И. Ф., Уткин И. С., Уткина Л.И.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
E-mail: isutliut@mtu-net.ru*

Показана роль проточных периферических и коровых магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов (Камчатка) в тепловом питании Мутновской гидротермальной системы. Выполнено численное исследование динамики роста и развития размеров нескольких верхнекоровых разновозрастных магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов, питающихся одной магматической питающей системой. При построении моделей динамики роста очагов учтено влияние флюидов в передаче тепла очагов во вмещающую эти очаги среду. Результаты моделирования динамики роста магматических очагов использованы для решения нестационарной задачи оценки распределения температур в среде вокруг магматических очагов, меняющих свои размеры. Это позволило выполнить расчёты температурных полей вокруг них и оценить запасы накопленного тепла во вмещающих очаги породах. Определена интенсивность доступного для энергетического использования теплового потока в районе Мутновского геотермального месторождения.

DYNAMICS OF THE DEVELOPMENT OF FLOWING MAGMATIC CHAMBERS ON MUTNOVSKO-GORELOVSKY GROUP OF VOLCANOS, THEIR THERMAL FIELDS AND UNDERGROUND HEAT, SAVED BY THEM

Fedotov S.A., Delemen I.F., Utkin I.S., Utkina L.I.

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky,
E-mail: isutliut@mtu-net.ru*

The investigation showed the role of the flowing peripheric and crust magmatic chambers on Mutnovsko-Gorelovsky group of volcanoes (Kamchatka) in a thermal supply of Mutnovsky hydrothermal system. The numerical research discovered certain changes in growth of the dimensions of several upper-crust magmatic chambers of different ages on Mutnovsko -Gorelovsky group of volcanoes supplied by one magmatic system. At construction of models of development of the chambers we took into account the influence of fluids in transfer of heat of the chambers on environment, containing these chambers. The results of modeling of development of the magmatic chambers are used for the decision of a non-stationary task of an estimation of temperature distribution in environment around of the magmatic chambers changing own sizes. The achieved results allowed to calculate the temperature fields around of chambers and to estimate reserves of saved heat in rocks, containing the chambers. Also was determined the intensity of a thermal flow, accessible to power use, in area of Mutnovsky geothermal field.

Многочисленные концепции теплового питания гидротермальных систем можно свести к нескольким основным группам. Тепловое питание таких систем может осуществляться за счёт:

- проточных магматических очагов вулканов;
- непроточных магматических тел (магматических интрузий, силлов и даек),

находящихся на разных стадиях остывания (консолидации);

-экзотермических реакций, происходящих между химическими компонентами в теплоносителе;

-поступления высокотемпературных флюидов из глубинных горизонтов литосферы;

-анатектического и палингенового плавления вещества земной коры.

Понятие проточного магматического очага было введено в вулканологии С.А. Федотовым [15]. Полость такого очага образуется при длительном плавлении вмещающих его пород магмой, протекающей через него при подъёме из глубинного источника к кратерам вулкана.

Несмотря на многообразие источников подземного тепла, имеющиеся геофизические данные о глубинной магматической деятельности под вулканами островных дуг [15] не оставляют сомнения в том, что в вулканических областях именно магматические системы вулканов дают основной энергетический вклад в питание расположенных в верхней части коры (0-3 км) высокотемпературных гидротермальных систем [18]. В данной работе мы оцениваем потенциальные ресурсы накопленного тепла каждого из магматических очагов, находящихся в пределах возможного конвективного взаимодействия с гидротермальным резервуаром Мутновской ГеоТЭС и даём представление о том, что это тепло составляет основу тепловых ресурсов данного региона. К числу таких очагов будем относить те из них, которые находятся на расстояниях не больших 5-6 своих диаметров от гидротермального резервуара Мутновской ГеоТЭС. В качестве объекта исследования выбрана Мутновская гидротермальная система – единственная высокотемпературная гидротермальная система Камчатки, где в последние годы осуществляется освоение новых геотермальных ресурсов. В районе вулканов Горелый и Мутновский наиболее вероятными основными источниками тепла являются компактно расположенные крупные магматические тела (**рис. 1**). Их наличие в недрах этих вулканов и смежных вулканических центров подтверждается протекающими здесь с плейстоцена и по настоящее время разнообразными вулканическими процессами. В Мутновско-Гореловском районе данные о существовании в нижних слоях земной коры и в верхней мантии под Мутновским и Горелым вулканами объемов, обогащенных расплавами, были впервые получены на основании изучения прохождения под этими вулканами сейсмических волн близких землетрясений [20]. В последующие годы наличие под Мутновским вулканом близповерхностного магматического очага предполагалось на основании

интерпретации изотопных данных, оценки масштабов дегазации, измерения температуры флюидов, разгружающихся на поверхности вулканического сооружения [11].

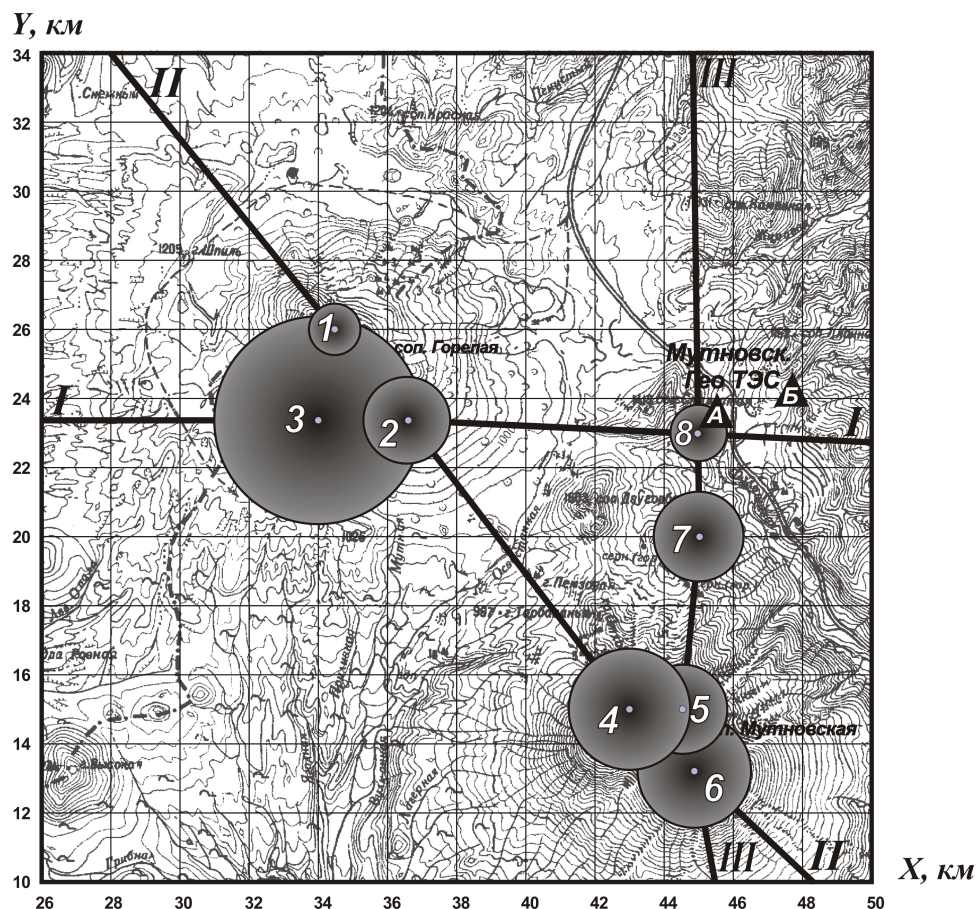


Рис. 1. Схема расположения магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов. Очаги показаны окружностями, диаметры которых соответствуют диаметрам очагов в настоящее время. Цифрами обозначены очаги: 1 - Горелый верхний; 2 - Горелый средний; 3 - Горелый нижний; 4 - Мутновский верхний; 5 - Мутновский средний; 6 - Мутновский нижний; 7 - Двугорбый; 8 - Скалистый. На схему вынесены положение Мутновской ГеоЭС (треугольники): А - Мутновская ГеоЭС, Б – Верхне-Мутновская ГеоЭС. Линии расчётных профилей обозначены: I-I, II- II, III- III.

1. Расчёт распределения температур и запасов тепла над группой компактно расположенных магматических очагов

Дальнейшее развитие методов расчёта, опубликованных в работах [14, 16, 17, 19], велось по трём направлениям.

Первое направление. В моделях роста и развития магматических очагов учитывается влияние температуры и содержание флюидов (воды) в магме на её теплофизические параметры, в частности, на её теплоёмкость.

Второе направление. Разработана методика расчётов нестационарного распределения температур в среде вокруг нескольких близко расположенных магматических очагов, имеющих различные времена зарождения. Учитывалось взаимное тепловое влияние динамически развивающихся во времени магматических

очагов, поскольку скорость их роста или замерзания существенно зависит от температуры окружающей среды.

Третье направление. Создана методика расчёта накопленного магматическими очагами тепла с момента их зарождения и до наших дней. Расчёты проводились как для тепла, сосредоточенного в самих очагах, так и в пространстве вмещающих очаги пород, ограниченном сферами, центры которых совпадают с центрами самих очагов. Выбор радиусов сфер, ограничивающих пространство учёта тепла, определяется температурой на их поверхности, не превышающей 5% от температуры стенки очага. Эта температура рассчитывается путём решения нестационарной задачи распределения температур в среде вокруг очагов.

2. Схема расчётов

Расчеты ведутся в несколько этапов.

1. Строится модель динамики роста и развития магматического очага, в основу которой заложена возможность расчёта нестационарных температурных полей в среде, вмещающей очаг, при меняющихся размерах самого магматического очага. Схема зарождения, роста, квазистационарной стадии и последующего замерзания проточных магматических очагов дана в работах [16].

Расчёты эволюции размеров магматического очага и его теплового поля выполнены по методикам, разработанным авторами [14, 19].

2. Результаты моделирования динамики роста магматических очагов используются для решения нестационарной задачи оценки распределения температур во вмещающей их среде. Реальная геометрия распределения тепла в окружающем очаг пространстве может существенно отличаться от рассчитанной за счёт конвекции, однако общее количество тепла, накопленного магматическим очагом во вмещающих породах за время своего существования за счёт кондуктивного теплопереноса, никак не может быть меньше реального, учитывающего все факторы, определяющие теплоотдачу очага. Конвекционное обтекание магматического очага флюидами, безусловно только увеличивает его теплоотдачу, но из-за низких скоростей обтекания влияние этого фактора незначительно и поэтому пренебрегается. Рассчитанные изотермы распределения температур, основанные на представлении о кондуктивном характере теплопередачи от магматического очага к окружающему его породам, указывают пространственное положение термоаномалий и те предельные глубины положения максимумов изотерм в этих аномалиях, ниже которых под влиянием конвекции они опуститься не могут.

Следует учитывать, что под влиянием конвекции положения максимумов изотерм могут значительно подняться и несколько сместиться в направлении вектора теплового потока.

3. На основе расчётов температурных полей вокруг магматических очагов выполнены оценки потенциальных запасов накопленного тепла и доступного для энергетического использования теплового потока, в частности, для теплового питания геотермального резервуара Мутновского месторождения. По причинам, указанным выше, расчёты накопленного тепла проводятся без учёта конвективной составляющей.

3. Исходные данные для моделирования

Тепловое питание Мутновского месторождения парогидротерм, расположенного в пределах зоны новейшей вулканической активности (Северно-Мутновская вулканическая зона) у северного подножия Мутновского вулкана (рис.1), связывается различными исследователями с теплом неостывших магматических тел, расположенных на глубине до 10-15 км [1, 4, 11]. По данным сейсморазведочных работ можно предположить наличие, по крайней мере, одного магматического очага на глубине 5-10 км под современной кратерной зоной Мутновского вулкана, и одного – под вулканом Горелым.

Методами сейсмического зондирования выявлены магматические тела под Дачным месторождением парогидротерм и на северном склоне Мутновского вулкана (участок Вулканный у подножия вулкана Двугорбого). На основании площадных исследований методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ), выполненных в 1980-е годы Ю.Ф. Морозом, А.П. Скрипниковым [8], а затем А.Г. Нурмухаметовым [9] выделены зоны повышенной проводимости в земной коре, соответствующие местам скопления магматического расплава в основании кальдеры вулкана Горелого и у северного подножия вулкана Мутновского.

Сопоставление всех имеющихся геолого-геофизических данных позволяет достаточно уверенно выделить на рассматриваемой территории по крайней мере, 8 разноглубинных участков скопления магмы в верхней коре, которые могут рассматриваться как разновозрастные проточные магматические очаги, находящиеся на различной стадии консолидации (замерзания). На поверхности им соответствуют в разной степени выраженные морфоструктуры центрального типа, а также хорошо дешифрируемые на материалах дистанционных съёмках радиально-концентрические системы разрывных нарушений и трещиноватости.

На основании интерпретации данных по отношению скоростей продольных V_p и поперечных сейсмических волн V_s (параметр $K=V_p/V_s$), сделан вывод о том, что очаг под Мутновским вулканом (рис. 1) смещен в плане в северо-восточном направлении от Активного кратера [9] и имеет глубину верхней кромки около 5-6 км [5].

За время зарождения проточного магматического очага вулкана центрального типа может приниматься начало его деятельности, время его первых извержений. В качестве возрастных реперов использованы опубликованные [2, 6, 7] немногочисленные определения радиоуглеродных датировок. В **таблице 1** приведены наиболее обоснованные, на наш взгляд, оценки геологического возраста отложений продуктов извержений для Горелого и Мутновского вулканов [12, 13]. Продуктивность магматических очагов оценивалась на основании учёта объёма вулканитов, оценённых этими авторами. Кроме того, дополнительный контроль объективности имеющихся данных осуществлялся сравнением их с суммарными оценками продуктивности вулкана [6].

Диагностика пространственного положения и других параметров магматических очагов осуществлялась с учётом петролого-геохимических [22], минералого-петрологических [21], вулканологических [106], геотермических [3] и других данных. Более подробно вопросы индикации магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов рассмотрены в работе [5].

В итоге оценка необходимых для моделирования параметров магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов была выполнена на основе сопоставления всего комплекса имеющихся геолого-геофизических, геоморфологических, дистанционных, петрологических и геотермических данных [5]. Их значения также приведены в таблице 1.

4. Результаты моделирования

Для расчётов зарождения и развития трёх очагов вулканов Горелый, Мутновский, а также вулканов Двугорбый и Скалистый использовались входные данные, представленные в таблице 1. Там же приведены результаты вычислений.

На **рисунке 2**, в качестве примера, представлена расчетная зависимость изменения радиуса R сферического очага вулкана Двухгорбый от времени с начала зарождения до наших дней. Убывание расхода магмы аппроксимируется кусочно-постоянными зависимостям $W(t)$. Общие закономерности роста и развития магматических очагов проявляется в следующем:

Таблица 1.

Входные данные и результаты расчета размеров магматических очагов вулканов Горелый, Мутновский, Двугорбый, Скалистый и их тепловых ресурсов.

Название очага	Длительность формирования, t , лет	Время зарождения магматического очага, t , лет	Средний расход магмы W , км ³ /год	Координаты центра залегания очага, X, Y, км	Глубина залегания очага, H, км	Температура вмещающих пород, T_c , °C	Температура вытекающей из очага магмы, T_2 , °C	Температура плавления вмещающих пород, T_c^{sol} , °C	Температура втекающей в очаг магмы, T_1 , °C	Средний радиус очага, R, м	Объем очага, V , км ³	Тепловая мощность, которую можно получить, используя энергию, накопленную во вмещающих породах в течение 1000 лет, P, МВт	Запасы тепла, накопленного в очаге во вмещающих породах от начала зарождения до наших дней, с радиусом 7R, Q _{7R} , Дж	Запасы тепла, накопленного магматическим очагом от начала зарождения до наших дней, Q ₈ , Дж	Тепловой поток, отдаваемый магматическим очагом, Ф, МВт
1	3		3	4	5	6	8	9	7	10	11	12	13	14	15
Горелый верхний	11000	11000	0.00236	34.37;25.55	3.0	96	1000	800	1250	1042.2	4.74	598.3	0.189 10 ²⁰	0.874 10 ¹⁹	42.9
Горелый средний	28000	39000	0.00381	36.90;23.66	10.9	349	900	900	1250	1775.0	23.43	2597.0	0.820 10 ²⁰	0.338 10 ²⁰	54.2
Горелый нижний	110000	150000	0.00675	34.06;23.33	15.9	509	1100	900	1300	2954.0	108.0	11710.0	0.370 10 ²¹	0.111 10 ²¹	58.9
Мутновский верхний	5000	5000	0.0006	43.17;14.86	1.7	57.6	900	900	1250	1538.0	15.24	944.6	0.298 10 ²⁰	0.336 10 ²⁰	125.2
Мутновский средний	5800	7000	0.00066	44.70;15.09	6.9	230	1000	900	1250	1137.4	6.16	489.9	0.155 10 ²⁰	0.108 10 ²⁰	53.5
Мутновский нижний	35000	35000	0.00313	45.27;13.68	11.2	370	1050	900	1300	1503.0	14.22	1800.0	0.568 10 ²⁰	0.197 10 ²⁰	41.7
Двугорбый	10000	13000	0.005	45.13;19.91	5.0	186	900	750	1250	1347.0	10.24	1563.0	0.493 10 ²⁰	0.142 10 ²⁰	35.4
Скалистый	5000	10000	0.0044	44.72;22.70	5.0	186	800	750	1250	1063.8	5.04	471.9	0.149 10 ²⁰	0.745 10 ¹⁹	36.4
									1200	1003.0	4.23	402.6	0.127 10 ²⁰	0.624 10 ¹⁹	33.2

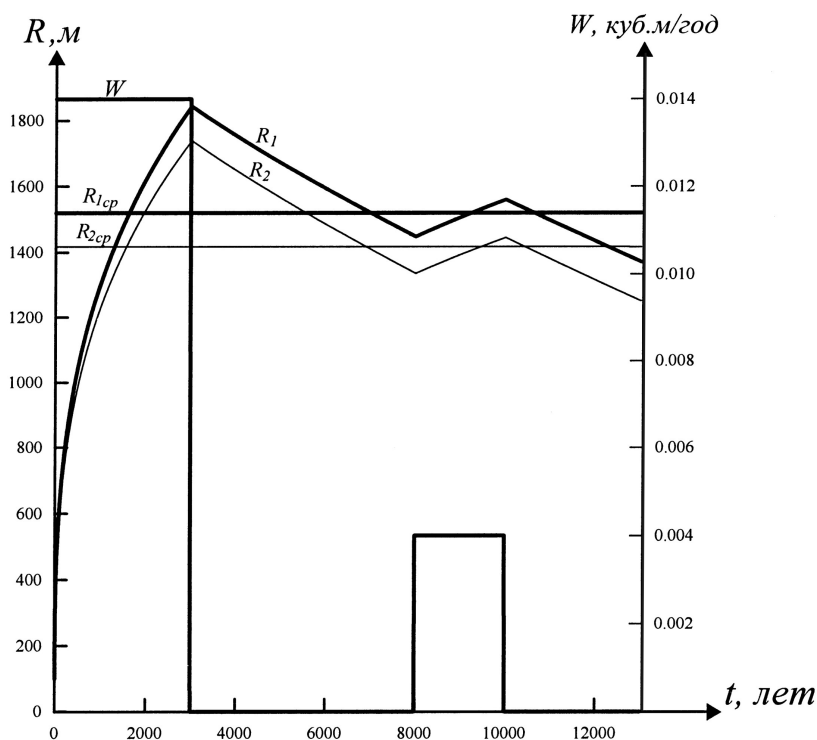


Рис. 2. Расчетные зависимости изменения радиусов R сферического очага вулкана Двугорбый от времени с начала зарождения до наших дней ($t = 13000$ лет) при убывании расхода магмы по кусочно-постоянным зависимостям $W(t)$ (построена по геологическим данным), на глубине залегания очага $H = 5$ км при температуре вмещающих пород $T_c = 186^\circ\text{C}$, температурах поступающей в очаг T_1 и вытекающей из очага магмы $T_2 = 900^\circ\text{C}$, и температуре плавления вмещающих пород $T_c^{sol} = 750^\circ\text{C}$. Зависимости R_1 и R_2 рассчитаны при $T_1 = 1250^\circ\text{C}$ и $T_1 = 1200^\circ\text{C}$, соответственно. Средние радиусы очагов R_{1cp} и R_{2cp} показаны горизонтальными линиями.

а) произведения времени его теплового питания, на среднее значения расхода магмы за период теплового питания,

б) отношения времени теплового питания очага ко времени его формирования.

Чем выше, при прочих равных условиях, численные значения факторов, указанных в п.п. а) и б), тем больших размеров может достигать магматический очаг.

3. Чем больших размеров достиг очаг до момента прекращения подпитки его магмой, тем больше время его остывания. Наибольшее время существования - 150000 лет у очага Горелый нижний. Время формирования очага этого вулкана составляет 110000 лет. Наименьшее время формирования у очагов вулканов Скалистый и Мутновский Верхний. Оно близко к 5000 лет. Однако у очага вулкана Скалистый время существования вдвое выше и составляет 10000 лет.

4. Представление о современных размерах магматических очагов можно получить из рисунка 1, где магматические очаги в плане показаны окружностями в

1. Скорость роста магматического очага в момент его образования и далее, при прочих равных условиях тем больше, чем выше через него расход магмы.

2. Магматический очаг достигает тем больших размеров, чем больше максимальный расход через него магмы и чем меньше скорость убывания этого расхода.

Максимальные размеры очага зависят от:

масштабе карты, на которую они нанесены. На рисунке 1 показаны три ломаные линии I, II, III вертикальных разрезов, проведённые так, чтобы они прошли через центры магматических очагов. Именно эти разрезы содержат наибольшую информацию о пространственном положении интересующих нас магматических очагов.

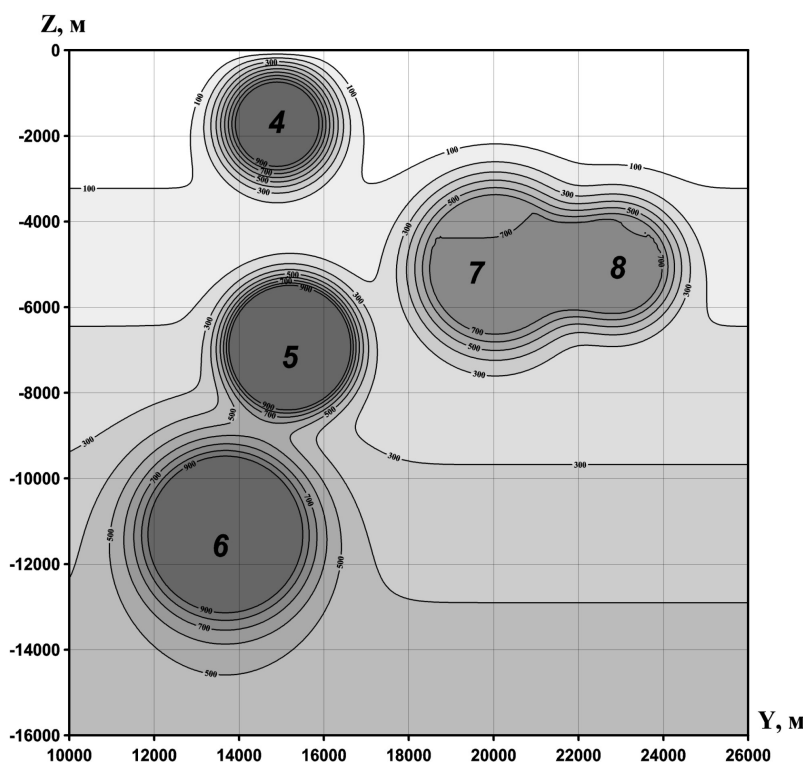


Рис. 3. Распределение температур по линии вертикального профиля III, проходящего через центры магматических очагов вулканов Скалистый - 8, Двугорбый - 7 и Мутновский (5 - средний, 6 - нижний). Разрез профиля III не проходит через центр магматического очага вулкана Мутновский верхний (4). Положение линии профиля показано на рис. 1.

На рис. 3, в качестве примера, показан вертикальный разрез вдоль ломаной линии III-III в координатах X, Z. На рисунке изображены центральные сечения очагов со средними радиусами, указанными в таблице 1.

На этом же рисунке показаны изотермы распределения температур в пространстве вмещающих очаги пород.

5. Обсуждение результатов

Обратимся к рис. 1, на котором показано размещение восьми магматических очагов, в непосредственной близости от Мутновской ГеоТЭС. Размеры очагов на рисунке соответствуют их современному состоянию. Построим мысленно вертикальный цилиндр минимального радиуса 4.7 км и минимальной глубины 19 км, вмещающий все восемь магматических очагов. Тогда Мутновская ГеоТЭС окажется расположенной в пределах указанного цилиндра. Построим цилиндр того же радиуса с центром в расположении Мутновской ГеоТЭС «А». В пространствах вмещающих пород и того и другого цилиндров геологи не находят соизмеримых по

объему с проточными магматическими очагами интрузии. В построенных выше зачётных цилиндрах нет восьми интрузий даже меньшего объёма. При соизмеримых суммарных объёмах интрузий и магматических очагов в зачётных цилиндрических объёмах, количество тепла, накопленное магматическими очагами, было бы во много раз больше тепла, накопленного интрузиями. Расчёты показывают (табл. 1, гр.12), что тепла, накопленного во вмещающих породах только наиболее близко расположенными к Мутновской ГеоТЭС магматическими очагами вулканов Двугорбый и Скалистый достаточно для производства электроэнергии мощностью не менее 240 и 118 МВт, соответственно, в течение 1000 лет. Учитывалась наиболее доступная часть тепловой энергии с температурами, превышающими температуры окружающих пород на 50°C, сосредоточенная только в верхних полусферах пород, вмещающих эти очаги. При оценке производимой электроэнергии предполагалось, что к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую не превышает 50%. Общее количество тепла вмещающих пород, окружающих все восемь рассматриваемых магматических очагов достаточно для производства 4890 МВт электроэнергии в течение 1000 лет. Условия расчётов те же. Вот те доводы, которые позволяют полагать, что для данного конкретного района Мутновского геотермального месторождения выполняется высказанное ранее общее утверждение о том, что основной энергетический вклад в питание расположенных в верхней части коры на глубинах 0-3 км высокотемпературных гидротермальных систем в вулканических областях обеспечивают проточные магматические очаги [16, 17].

Математическое моделирование тепловой истории магматических очагов, расположенных у границ геотермального резервуара, позволяет оценить нижнюю грань его тепловых запасов, которую обеспечивает тепло магматических очагов. Оценка тепла, накопленного проточными магматическими очагами и вмещающими их породами, представляет основную, но не единственную составляющую всего накопленного тепла. Дополнительно следует учесть её меньшую часть, накопленную интрузиями, дайками и силлами, а также тепло накопленное во вмещающих эти магматические тела породах.

Главное значение результатов, получаемых при оценке размеров магматических очагов, окружающих Мутновское геотермальное месторождение, состоит в том, что они должны являться основой для расчётов региональной конвективной системы, вмещающей локальную конвективную систему, питающую собственно пароводяные резервуары Мутновского месторождения.

Выводы

1. Проведено численное исследование зависимости размеров магматических очагов от времени, составляющих ближайшее окружение геотермального месторождения Мутновской ГеоТЭС. Рассчитаны средние размеры магматических очагов вулканов Горелый, Мутновский, Двугорбый и Скалистый.
 2. Получены распределения температур вокруг магматических очагов указанных выше вулканов на основе представлений о кондуктивном характере теплопереноса от магматических очагов к вмещающих их породам. Эти распределения температур позволяют достаточно точно оценить количество накопленного вокруг магматических очагов тепла.
 3. По результатам расчётов трёхмерных температурных полей вокруг магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов, проведены оценки современных потенциальных запасов накопленного тепла и теплового потока, связанных с этими магматическими очагами. Расчёты показали, что потенциальных тепловых ресурсов магматических очагов вулканов Двухгорбый и Скалистый достаточно для производства электроэнергии мощностью, соответственно 240 и 118 МВт, а потенциальных тепловых ресурсов всех восьми магматических очагов достаточно для производства 4890 МВт электроэнергии в течение 1000 лет.
 4. Показано, что подавляющая часть тепловых ресурсов в районе Мутновской ГеоТЭС накоплено 8 проточными периферическими и коровыми магматическими очагами Мутновско-Гореловской группы вулканов.
 5. Показана необходимость использования данных проточных магматических очагов: положения в пространстве вмещающих пород и накопленного ими тепла при формировании граничных и начальных условий для моделирования тепловых процессов в зонах извлечения тепла из геотермальных резервуаров ГеоТЭС.
- Работа выполнена по программе и при финансовой поддержке РФФИ, проект № 02-05-64979, а также по проекту Государственной поддержки ведущих научных школ, грант № НШ – 2294.2003-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н. Тектоническое районирование Центральной и Южной Камчатки по геологическим и геофизическим данным // Тихоокеанская геология. 1989. № 1. С. 53-66.*
2. *Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В. и др. Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4-5. С. 5-32.*

3. Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм // Под ред. В.М. Сугрובה. М.: Наука. 1986. 305 с.
4. **Гриб Е.Н.** Состав и условия кристаллизации лав вулканических построек Северо-Мутновской вулканической зоны // Вулканология и сейсмология. 1989. № 4. С. 29-43.
5. **Делемень И.Ф., Мельников Д.В., Кожемяка Н.Н.** Индикация магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов по геолого-геофизическим и дистанционным данным // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2005. № 5 (в печати).
6. **Кожемяка Н.Н.** Долгоживущие вулканические центры Камчатки: типы построек, длительность формирования, объем вулканитов, продуктивность, баланс вещества, тектоническое положение // Вулканология и сейсмология. 1995. № 6. С. 3-19.
7. **Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарёва В.В., Сулержицкий Л.Д.** Возраст и динамика формирования действующих вулканов Курило-Камчатской области // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1990. № 4. С. 17 – 31.
8. **Мороз Ю.Ф., Скрипников А.П.** Глубинная геоэлектрическая модель вулкана Горелый на Камчатке // Физика Земли. 1995. № 7. С. 82 – 88.
9. **Нурмухаметов А.Г.** Геолого-геофизическая модель Мутновского месторождения парогидротерм по данным МТЗ // Геология и полезные ископаемые Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ГПП "Камчатгеология". 2005 (в печати).
10. **Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В.** Продуктивность вулканических аппаратов // Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 22-37.
11. **Потапов В.В.** Физическая модель тепломассопереноса в магматогенной геотермальной системе под вулканом Мутновский // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 21-29.
12. **Селянгин О.Б.** Новое о вулкане Мутновский: строение, развитие, прогноз // Вулканология и сейсмология. 1993. № 1. С.17-35.
13. **Селянгин О.Б., Пономарёва В.В.** Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 2. С. 3-23.
14. **Уткин И.С., Федотов И.С., Уткина Л.И.** Об эволюции и размерах магматических очагов вулканов // Вулканология и сейсмология. 1999. № 3. С. 7–18.
15. **Федотов С.А.** О механизме глубинной магматической деятельности под вулканами островных дуг и сходными с ними структурами // Изв. АН СССР. Серия геол. 1976. № 5. С. 25-37.
16. **Федотов С.А.** О входных температурах магм, образовании, размерах и эволюции магматических очагов вулканов // Вулканология и сейсмология. 1980. № 4. С. 3-29.
17. **Федотов С.А.** Расчет питающих каналов и магматических очагов вулканов, имеющих устойчивые размеры и температуру. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 3. С. 3-17.
18. **Федотов С.А., Балеста С.Т., Дроздин В.А., Масуренков Ю.П., Сугрбов В.М.** О возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана // Бюлл. вулканол. станций. 1977. № 53. С. 27-37.
19. **Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И.** Оценка размеров коровых очагов вулканов и изменения их размеров во времени по данным о количестве, составе изверженных продуктов и глубине очага. // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 3-13.
20. **Федотов С.А., Фарберов А.И.** Об экранировании поперечных сейсмических волн и магматическом очаге в верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов // Вулканизм и глубинное строение Земли. М.: Наука. 1966.
21. **Чащин А.А.** Изгнимвиты вулкана Горелого (Южная Камчатка): состав, условия формирования // Проблемы геологии, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых Дальнего Востока / Тр. ДВГТУ. Вып. 121. Сер. 4. Владивосток. 1999. С. 142 – 148.
22. **Martynov Yu.A., Perepelov A.B., Chashchin A.A.** Geochemical classification of basalts with references to the Mutnovsky volcanic field in South Kamchatka // Geology of Pacific Ocean. 1996. No 12. P. 875-892.