

УДК 551.21

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА МАГМАТИЧЕСКОГО ОЧАГА АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА И ОКРУЖАЮЩИХ ЕГО ПОРОД ДЛЯ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

© 2006 г. С.А.Федотов*, В.М.Сугробов*, И.С.Уткин**, Л.И.Уткина**

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

**Институт физики Земли РАН, Москва, 123995

Опубликовано в журнале «Вулканология и сейсмология», 2007, №1, стр. 32-46.

Адреса для переписки:

Федотов С.А.: Петропавловск-Камчатский, тел. (41522)506-03;

e-mail: fedotov@kscnet.ru; Москва, тел. 699-04-74, e-mail: karetn@online.ru

Сугробов В.М.: Москва, тел. 464-89-48;

Уткин И.С.: Москва, тел. 501-17-47; e-mail: ISUTLIUT@mtu-net.ru

Аннотация

Проведен анализ результатов геологических и геофизических исследований, в том числе последних лет, позволяющих судить о наличии не застывшего магматического очага под Авачинским вулканом на Камчатке и оценить глубину его залегания и примерные размеры. Дана оценка запасов тепла нагретых магматическим очагом вулкана горных пород с момента его возникновения и до настоящего времени с учётом переменных размеров магматического очага в процессе эволюции и накопления им тепла. Проанализированы геолого-геофизические предпосылки возможности использования тепловой энергии нагретых пород, вмещающих магматический очаг, для тепло- и электроснабжения города Петропавловска-Камчатского. Предлагается создание подземной геотермальной циркуляционной системы (трещинного теплообменника) с помощью бурения глубоких скважин.

POSSIBILITIES OF USE OF HEAT OF MAGMATIC CHAMBER OF THE AVACHINSKY VOLCANO FOR HEAT AND ELECTROSUPPLY

S.A. Fedotov*, V.M. Sugrobov*, I.S. Utkin, L.I. Utkina****

**Institute of volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

***Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia*

The analysis of the data geological and geophysical researches, including the carried in last years, allow to judge on presence of non- solidified magmatic chamber Avachinsky volcano, Kamchatka and to estimate its depth and approximate sizes. The estimation of reserves of heat accumulated up by magmatic chamber Avachinsky volcano in surrounding dry rocks from the moment of its occurrence till now is given in view of the variable sizes of the magmatic chamber during evolution and accumulation of heat by it.

The investigated geological and geophysical preconditions testify to a basic opportunity of use of thermal energy of the dry heated up rocks containing the magmatic chamber for heat and electrosupply of city Petropavlovsk-Kamchatsky. Creation with the help of drilling of deep wells interstitial heat exchanger (underground geothermal circulating system) is offered.

Введение

В результате геофизических исследований Авачинской группы вулканов, проведенных в 1960-62 гг. Институтом вулканологии, под Авачинским вулканом был обнаружен промежуточный магматический очаг [30], создающий характерную аномалию в геотемпературном поле [16]. В 1964-67 годы при разработке плана глубокого бурения на гидротермальных системах и в зоне влияния магматических тел, по предложению В.В. Аверьева, намечалось бурение на Авачинском вулкане с целью изучения физических свойств горных пород, химического состава флюида в условиях высокотемпературных аномалий. Предполагалось также эмпирически исследовать геотермические условия в сфере влияния магматического очага (приочаговой зоне) для оценки возможного использования ресурсов тепла в энергетических целях.

Предложение В.В. Аверьева получило развитие в работе С.А. Федотова и др. [28,36], в которой были проанализированы результаты комплексных геолого-геофизических исследований в районе Авачинского вулкана. Они показали, что периферический магматический очаг вулкана располагается на границе верхнемелового фундамента и перекрывающей его неоген-четвертичной вулканогенной толщи. Верхняя кромка очага по сейсмическим данным находится на 1,5 км ниже уровня моря, а центр тяжести аномальных масс по гравиметрическим данным - на глубине 4 км. Размеры очага в плоскости фундамента по данным сейсморазведки оценивались радиусом $5,2 \pm 0,9$ км. Приведено стационарное распределение температур вокруг очага (эллипсоида вращения с полуосями радиусами 5,2 и 2,5 км), полученное моделированием на сеточном электроинтеграторе. При этом, в частности, было показано примерное положение характерной изотермы 250°C^* через 20 тыс. лет после начала развития очага. Результаты решения нестационарной тепловой задачи для магматического очага сферической формы, представленные распределением температуры вокруг очага [28], мало отличались от расчётов, выполненных ранее Б.Г.Поляком [16]. В [16] показано, что, даже при стационарном распределении температур вокруг магматического очага (бесконечно большом времени его существования) температурная аномалия, создаваемая очагом, на удалении 15 км от оси вулкана не проявляется на региональном температурном фоне. Из предположения о высокой температуре очага (1000°C) и большого объема нагретых пород, был очевиден его громадный энергетический потенциал. При эллипсоидальной

* Температура нагретых пород в 250°C и выше уже представляет интерес для энергетического использования.

форме магматического очага с полуосями в 2.5 и 5.2 км объем очага Авачинского вулкана равен 283 км^3 . Ресурсы тепла самого очага при таком объёме и перепаде температур 900°C составляют около $7.5 \cdot 10^{20}$ Дж. Как следует из результатов [28] за 20 000 лет существования очага в приочаговой зоне накапливается не менее четверти тепла очага, что при приведённых выше размерах очага составляет $1.87 \cdot 10^{20}$ Дж. Для извлечения тепла горных пород приочаговой зоны рекомендовалось создание подземных тепловых котлов с помощью бурения глубоких скважин [28].

В настоящее время идея изучения и использования периферического магматического очага Авачинского вулкана в энергетических целях снова выдвигается Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и Российской Ассоциацией «Геотермальное энергетическое общество» [39]. Обусловлено это поисками для г. Петропавловска-Камчатского, находящегося вблизи вулкана, надежного источника теплоснабжения, не связанного с дорогостоящим потреблением органического топлива. Извлечение же накопленной магматическим очагом и вмещающими его породами тепловой энергии сейчас представляется вполне осуществимым в связи с успехами в разработке технологии освоения тепла «сухих» горных пород - Hot dry rock technology. Например, работы по проекту в Сульц-су-Форе (The Soultz-Sous-Forêts H.D.R. project) и другие [32-34,37,40].

В данной работе на основе обобщения материалов геологических и геофизических исследований прошлых лет, данных, полученных в последние годы, а также новых расчётов по оценке запасов тепла, накопленного во вмещающих периферический магматический очаг горных породах, рассматривается проблема возможного использования тепловой энергии Авачинского вулкана.

1. Геолого-геофизические данные о строении Авачинского вулкана, положении и размерах его магматического очага

Авачинский вулкан расположен в окрестностях г. Петропавловска-Камчатского. Расстояние от кратера вулкана до города 25-28 км. Авачинская группа вулканов образует ряд среднеплейстоцен-голоценовых вулканов, протягивающихся с северо-запада на юго-восток (рис.1): Ааг (2319 м), Арик (2187 м), Корякский (3456 м), Авачинский (2771 м) и Козельский (2190 м) [12].

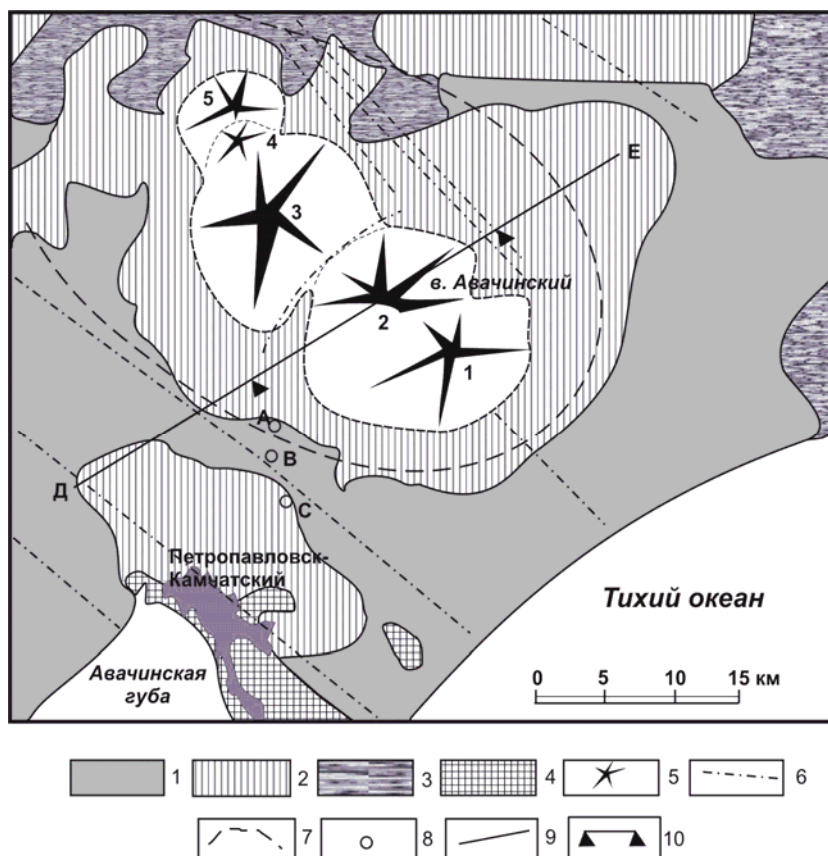


Рис. 1. Расположение Авачинской группы вулканов (по Геолого-тектонической схеме района Авачинского вулкана С.Е. Апрелькова [15]). 1 — современные отложения; 2 — четвертичные отложения; 3 — палеогеновые (Pg_3) и неогеновые (N_2) отложения; 4 — мезозойские отложения (C_{T2}); 5 — вулканические постройки и их границы; 6 — разрывные нарушения; 7 — контуры неотектонических образований: вулкан Козельский (1), вулкан Авачинский (2), Корякский (3), Арик (4), Ааг (5); 8 — глубокие скважины: А – ГК-2а, В – ГК-2, С – ГК-1; 9 – линия разреза на рис. 3 по сейсмопрофилю КМПВ; 10 — линия осевого сечения магматического очага вулкана Авачинский с распределением температур во вмещающих породах (см. рис 5,6).

Вулканы этой группы, расположены в вулканотектонической депрессии. Фундаментом вулканогенных образований неоген-четвертичного возраста являются сильно дислоцированные верхнемеловые породы вулканогенно-осадочного геосинклинального комплекса, фации зеленых сланцев. Их кровля максимально опущена непосредственно под Авачинским вулканом на глубину 1,5 км от уровня моря. Вулканогенные и интрузивные породы миоценового возраста в районе Авачинской группы вулканов погребены под более молодым верхнеплиоцен-нижнеплейстоценовым вулканическим комплексом. Андезиты, андезито-базальты и базальты этого комплекса составляют основание вулканической группы.

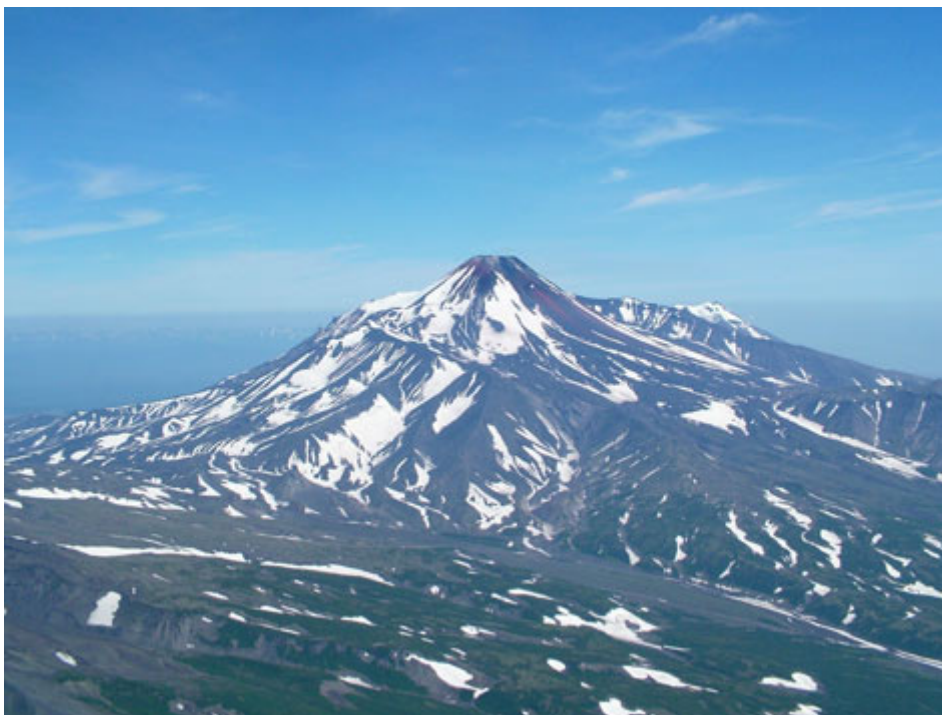


Рис. 2. Авачинский вулкан типа Сомма-Везувий (фото Я.Д. Муравьева).

Вулканы Корякский и Авачинский активны с верхнего плейстоцена доныне. Авачинский вулкан имеет сложное строение, типу Сомма-Везувий (рис.2) и длительную историю развития [12]. В конце верхнеплейстоценового интерстадиала (35 тыс. лет) произошел его катастрофический взрыв, направленный к юго-юго-западу. 25 км³ взрывных отложений покрыли площадь 450 км². Взрывы значительно меньшей мощности происходили 5500, 3200 и 2500 лет назад. В образовавшейся кальдере последние 3500 лет формируется Молодой конус, из которого в историческое время (с 1737 г.) произошло не менее 15 извержений. При этом вынос магматического вещества (продуктивность вулкана) уменьшалась в течение 60 тысяч лет его существования. В первые 25 тысяч лет продуктивность вулкана составляла $7 \cdot 10^6$ т/год, в период с 25 тысяч лет до 5,5 тысяч лет - $3,4 \cdot 10^6$ т/год, и была равна $2,5 \cdot 10^6$ т/год в течение последних 5,5 тысяч лет [17]. Последние эруптивные события в январе 1991 г. на Авачинском вулкане привели к заполнению кратера глубиной до 200 м лавой и ее излиянию на юго-восточный склон конуса. В межпароксизмальную стадию деятельности вулкана, до этого извержения, в кратере диаметром 400-450 м и в верхней части молодого конуса естественные выходы тепла были представлены прогретыми участками, парящими площадками, фумаролами. На дне кратера температура пород в местах выходов вулканических газов достигала 700°C.

Комплексные геофизические исследования глубинного строения Авачинского вулкана, включающие наземную магнитную съемку, аэромагнитную съемку, гравиметрические съемки, сейсморазведочные работы в различной модификации и ГСЗ позволили выявить под вулканом близповерхностную аномальную зону, отождествляемую с периферическим магматическим очагом [2,30,36].

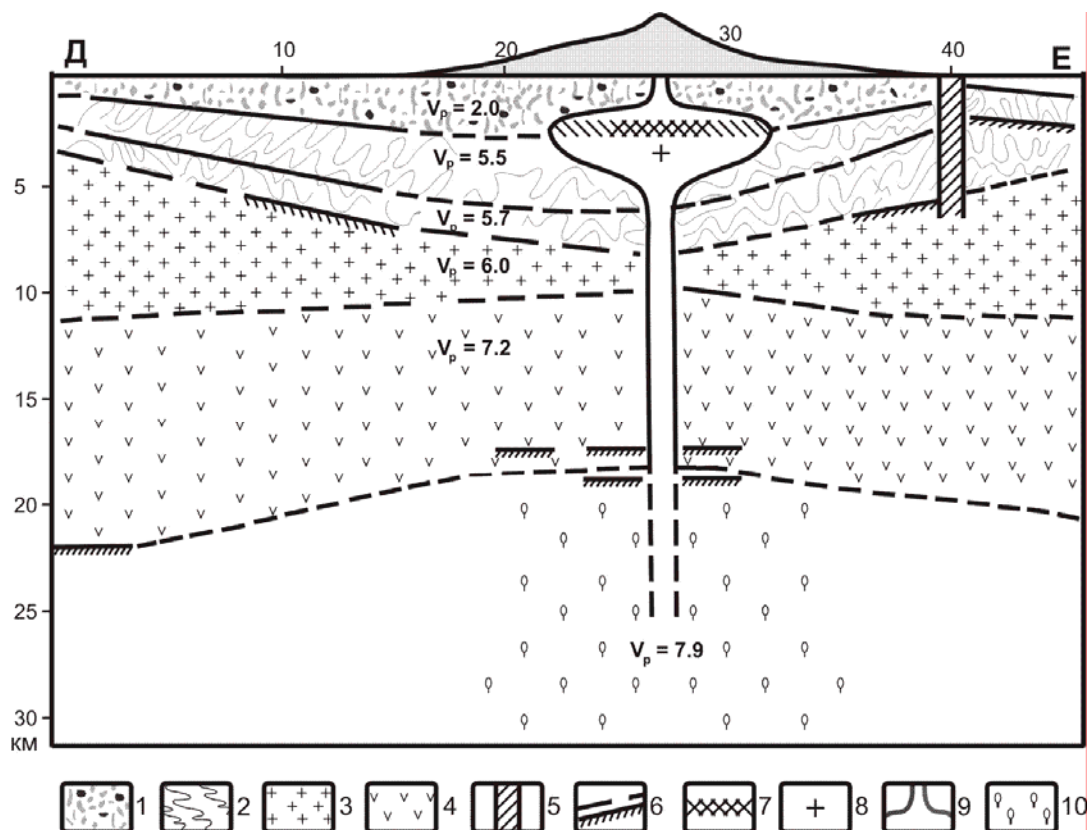


Рис. 3. Геолого-геофизический профиль района Авачинского вулкана по данным [28]. 1 – вулканокластические образования; 2 – кристаллические породы верхнемелового фундамента; 3 – «гранитный» слой; 4 – «базальтовый» слой; 5 – глубинные разломы; 6 – сейсмические границы по данным глубинного сейсмического зондирования; 7 – границы магматического очага по сейсмическим данным и коровой части его питающего канала; 8 – центр тяжести аномальных масс; 9 – предполагаемая форма магматического очага; 10 – область питания Авачинского вулкана по сейсмологическим данным. V_p – скорость продольных сейсмических волн.

На основании данных ГСЗ земная кора под Авачинским вулканом имеет аномальное строение. Мощность ее по сравнению с прилегающими районами резко уменьшена и достигает 20-22 км. Мощность "гранитного" слоя также резко сокращена и составляет 6 км, "базальтовый" слой со скоростью прохождения сейсмических волн ($V_p=7,2$ км/сек) залегает неглубоко (9-10 км). Геолого-геофизический разрез под вулканической постройкой характеризуется значительной неоднородностью упругих

свойств. В интервале глубин 1,5-5 км от уровня моря выделяется зона относительно пониженных скоростей, а в верхней части - область повышенного поглощения высокочастотных составляющих P -волн. Интерпретация геофизических данных приводит к выводу о том, что периферический магматический очаг Авачинского вулкана располагается на границе верхнемелового фундамента и покрывающей вулканогенной толщи. При глубине залегания верхней кромки очага - 1,5 км от уровня моря и глубине центра тяжести аномальных масс по гравиметрическим данным 4 км размеры очага по данным сейсморазведки определяются в плоскости фундамента кругом с радиусом $5,2 \pm 0,9$ км [2,36]. Наиболее "разогретая" часть очага оценивается радиусом 3,6 км. Физические параметры вещества очага оцениваются по прохождению сейсмических волн (скорость продольных волн - 2200 м/сек, вязкость пород - 10^6 - 10^8 пуаз). Упрощенная схема и положение магматического очага, основанное на вышеприведенных данных, показаны на рис. 3 [36].

Исследования в районе Авачинского вулкана в последующие годы принципиально не изменили представление о положении и размерах периферического магматического очага. Несколько изменились оценки глубин залегания его верхней и нижней кромок [15]. Выполненный в 1982-1984 годы непрерывный сейсмический профиль КМПВ-ГСЗ, пересекающий Авачинский вулкан с юга-запада на северо-восток, подтвердил существование области с повышенными поглощающими свойствами и инверсией скоростей сейсмических волн в интервале глубин 1,5-3 км. Эта область, как и ранее отождествляется с периферическим магматическим очагом [4]. При той же глубине залегания область (очаг) сдвинута по линии профиля на северо-восток, а поперечник составляет 5-6 км. В модели строения Авачинского вулкана по результатам гравиметрической съемки [8] под вулканом выделен аномальный объект, интерпретируемый как периферический очаг с максимальным радиусом около 5 км и глубиной залегания от 0 до 6 км ниже уровня моря. На основании обширных геофизических исследований глубинного строения района Авачинско-Корякской группы вулканов Ю.Ф. Мороз и Л.И. Гонтовая [15] также выделяют периферический магматический очаг Авачинского вулкана, но на глубине от 0 до 3 км и диаметром в горизонтальной плоскости до 5 км.

Следует отметить, что измерения теплового потока в зоне теплового воздействия магматического очага не проводились. Измерения же в трех скважинах, расположенных на расстоянии 20, 16 и 14 км от кратера вулкана Авачинский (рис. 1) - ГК-1 (температура 24°C на глубине 1120 м), ГК-2 (температура $14,5^\circ\text{C}$ на глубине 755 м), ГК-2а (температура $17,5^\circ\text{C}$ на глубине 820 м), , показали, что величина теплового потока здесь изменяется в

узком диапазоне: 57-70 мВт/м², что в целом соответствуют фоновому значению теплового потока (62 мВт/м²) для Корякско-Авачинской депрессии [19]. Они, также как и аналитические расчеты [16, 28,36] показали, что влияние магматического очага заметно лишь в геотемпературном поле приочаговой зоны, то есть на расстоянии не более 14 км от вертикальной оси вулкана.

Первоначальные данные оценок запаса тепла в магматическом очаге [17,25,26,28,36] дополнены сейчас расчетами тепла, накопленного периферическим магматическим очагом Авачинского вулкана во вмещающих его породах со времени зарождения очага.

2. Запасы накопленного тепла в очаге и приочаговой зоне (во вмещающих очаг горных породах)

С момента зарождения магматические очаги вулканов в течение тысячелетий непрерывно меняют свои размеры, накапливая за период своей деятельности во вмещающих породах тепло [23,24,27,29]. Под периодом деятельности, в случае Авачинского вулкана, будем подразумевать весь период его существования, когда извержения следуют одно за другим без больших перерывов, во время которых магматический очаг не успевает не только замёрзнуть, но и существенно (на десятки процентов) изменить свои размеры, а извергнутая магма замещается в очаге поступающей снизу более разогретой.

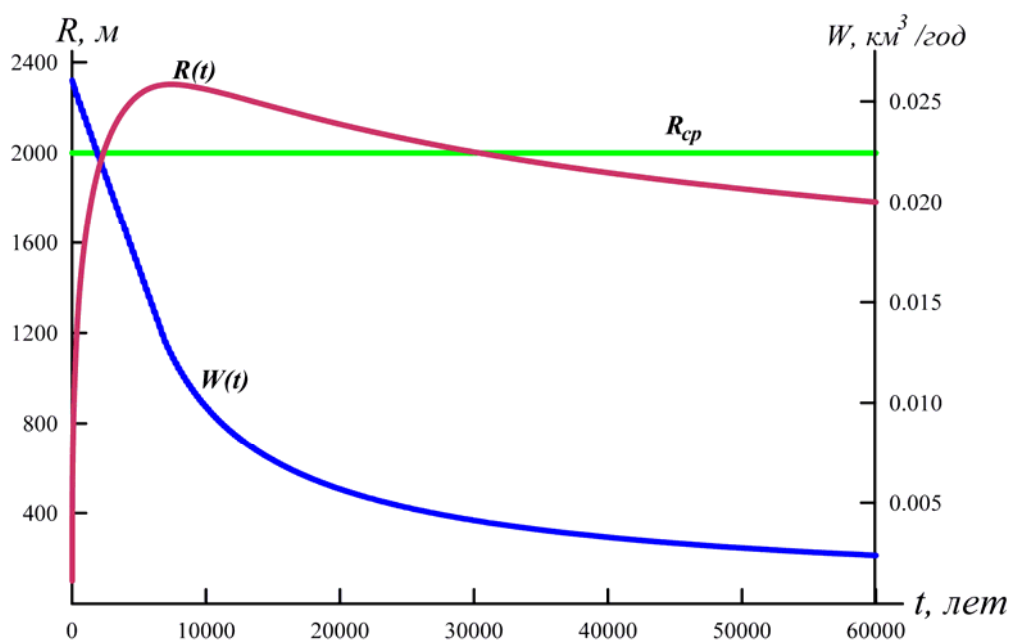


Рис. 4. Расчетная зависимость изменения радиуса $R(t)$ сферического очага вулкана Авачинский от времени с начала зарождения вулкана (60 тыс. лет тому назад) до на стоящего времени при убывании расхода магмы по линейной

зависимости $W(t) = 0.5563 \times 10^{10} \times [-1/7000^{1.79} \times (t-7000) + 1/7000^{0.79}]$ м³/год (до 7000 лет) и по гиперболической зависимости $W(t) = 0.5563 \times 10^{10} / t^{0.79}$ м³/год (свыше 7000 лет). Глубина залегания очага $H = 2$ км от уровня моря при температуре вмещающих пород $T_c = 150^\circ\text{C}$, температуре поступающей в очаг магмы $T_l = 1250^\circ\text{C}$, вытекающей из очага магмы $T_2 = 900^\circ\text{C}$, и температуре плавления вмещающих пород $T_c^{sol} = 900^\circ\text{C}$. Зависимость R рассчитана при суммарном расходе магмы за время существования вулкана $\Omega = 380$ км³.

На рис. 4 показана динамика изменения размеров магматического очага Авачинского вулкана при сферической аппроксимации его формы. Моделирование роста и развития очага проводилось по методикам [23,24,29]. Для расчёта количества накопленного тепла приняты усреднённые за весь период деятельности вулкана размеры магматического очага. При этом использованы результаты расчётов эволюции магматического очага в процессе его роста и развития. Для Авачинского вулкана это возможно, поскольку за период его существования не отмечено длительных пауз между извержениями, таких при которых очаг мог бы замёрзнуть. Нагревание магматическими очагами вмещающих пород происходит длительное время, в течение которого очаги существенно меняют свои размеры. Для того чтобы отследить эти изменения необходимо смоделировать динамику их роста и развития.

Для этого используется небольшое число наиболее достоверных и доступных данных, характеризующих параметры очага и процессы, происходящие в нем: глубина залегания очага H ; зависимость расхода магмы через очаг от времени $W(t)$; теплофизические параметры магмы и вмещающих пород: удельная теплоемкость c , теплопроводность λ , температуропроводность χ , плотность ρ , скрытая теплота плавления L , соответственно; температура втекающей в очаг магмы T_l , температура стенки очага T_2 , температура плавления вмещающих пород T_c^{sol} , температура вмещающих пород T_c ; длительность существования очага τ .

Следует отметить устойчивость оценки среднего радиуса сферы магматического очага, получаемой в результате расчёта эволюции его размеров к вариациям исходных данных, используемых для моделирования роста и развития магматического очага. Величина среднего радиуса магматического очага (при отсутствии продолжительных пауз между извержениями) в значительной степени определяется интегральными характеристиками расхода магмы через очаг, т.е. общим количеством изверженного материала за всю историю существования вулкана. Последнее поддаётся более точной оценке, чем оценка текущего расхода магмы в процессе эволюции роста и развития вулкана, и взята из достаточно надёжных источников [10,11,17].

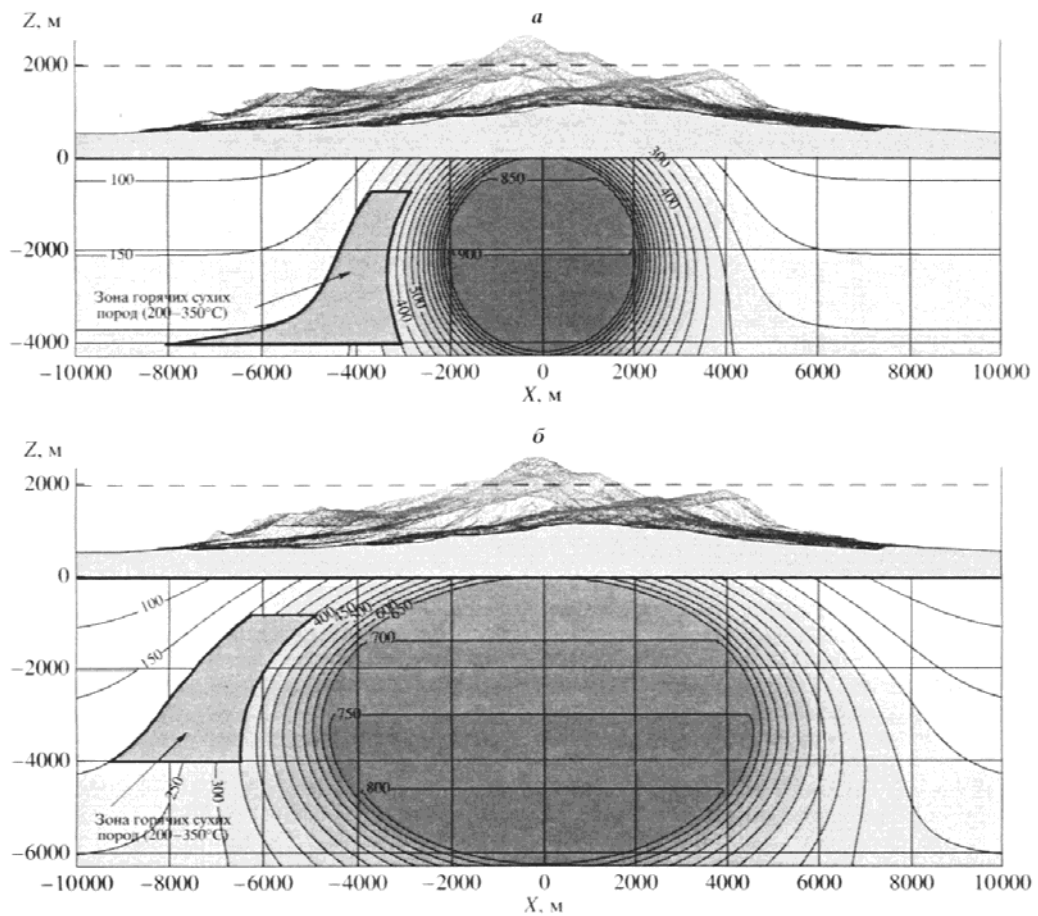


Рис. 5. Расчетное распределение температур вокруг магматического очага вулкана Авачинский в разрезе геолого-геофизического профиля ДЕ (рис. 1,7).

а. Глубина залегания очага от уровня моря $H=2$ км (вариант 1, табл.). Средний радиус очага $R_{cp} = 2.0$ км. Температура стенки очага $T_2 = 900^\circ\text{C}$. Глубина бурения скважин $H_c=3.5$ км. Пунктирной линией показана средняя высота толщи Земли над магматическим очагом в пределах его теплового влияния, определяемого изотермой $T_{из} = 200^\circ\text{C}$. Количество тепла, сосредоточенное в зачетном объеме тороида в горячих сухих породах ($200 - 350^\circ\text{C}$) $Q = 1.48 \cdot 10^{20}$ Дж.

б. Глубина залегания очага от уровня моря $H=3,0$ км (вариант 3, табл.). Малая и большая полуоси эллипсоида вращения вокруг вертикальной оси равны 3,0 и 4,6 км, соответственно. Температура стенки очага $T_2 = 700^\circ\text{C}$. Глубина бурения скважин $H_c=3,5$ км. Пунктирной линией показана средняя высота толщи Земли над магматическим очагом в пределах его теплового влияния, определяемого изотермой $T_{из} = 200^\circ\text{C}$. Количество тепла, сосредоточенное в зачетном объеме тороида в горячих сухих породах ($200 - 350^\circ\text{C}$) $Q = 1.48 \cdot 10^{20}$ Дж.

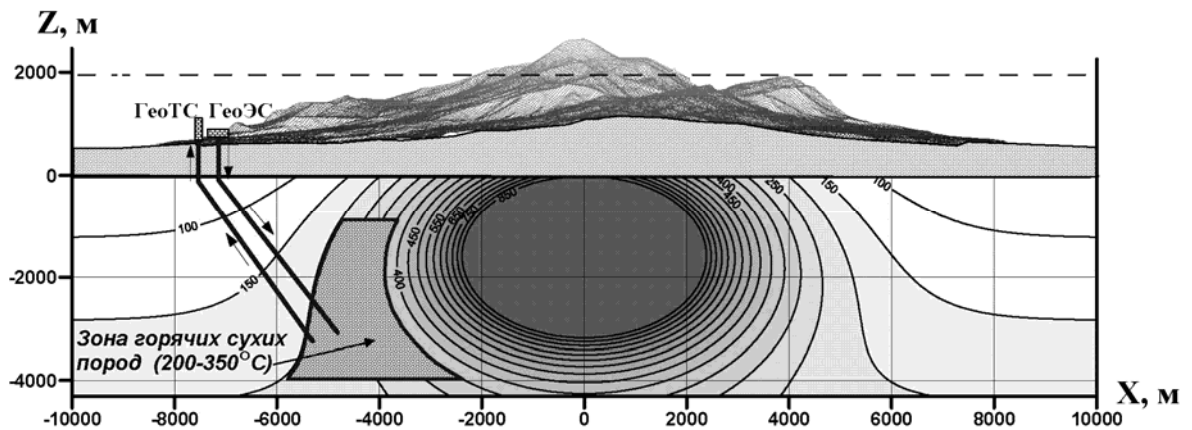


Рис. 6. Расчетное распределение температур вокруг магматического очага вулкана Авачинский и положение скважин возможной геотермальной циркуляционной системы в разрезе геолого-геофизического профиля ДЕ (рис. 3). Возраст очага - 60 тыс.лет. Глубина залегания очага от уровня моря $H=1,5$ км (вариант 2, табл.). Малая и большая полуоси эллипсоида вращения вокруг вертикальной оси равны 1,5 и 2,25 км, соответственно. Температура стенки очага $T_2 = 900^\circ\text{C}$. Глубина бурения скважин $H_c=3,5$ км. Пунктирной линией показана средняя высота толщи Земли над магматическим очагом в пределах его теплового влияния, определяемого изотермой $T_{из} = 200^\circ\text{C}$. Количество тепла, сосредоточенное в зачетном объеме тороида в горячих сухих породах (200 – 350°C) $Q = 0,99 \cdot 10^{20}$ Дж.

Распределение температур вокруг сферического магматического очага получено в результате аналитического решения нестационарной, в отличие от работы [16], тепловой задачи в полупространстве [9]. Распределение температур вокруг сферического очага (радиус сферы около 2 км) и времени его существования 60 000 лет даёт результаты, близкие к распределению температур при бесконечно большом времени существования очага (стационарное распределение температур) [16]. При оценке запасов тепла во вмещающих очаг породах, форма очага аппроксимировалась сферой в предположении, что эти породы изотропны (рис.5-а) и эллипсоидами с вертикальной осью вращения (рис. 5-б, 6) для анизотропной слоистой и (или) трещиноватой среды. Коэффициент теплопроводности в этом случае в горизонтальном направлении был принят в 1.5 раза большим, чем в вертикальном.

Таблица.

**Исходные данные и результаты расчета размеров магматического очага¹
вулкана Авачинский и его тепловых ресурсов**

Вариант	Глубина залегания очага от уровня моря, м	Размеры магматического очага, м	Объем очага, км ³	Температура вмещающих пород, T, °C	Температура втекающей в очаг магмы, T ₁ , °C	Температура стенки очага, T ₂ , °C	Объем тороида, образованного вращением фигуры ² вокруг вертикальной оси очага (зона горячих сухих пород 200 – 350 °C), км ³	Запасы тепла ³ , накопленного очагом во вмещающих породах от начала зарождения до наших дней в указанном объеме тороида, 10 ²⁰ Дж
1	2000	Средний радиус R = 2000	33,5	108	1250	900	154.0	0.86
2	1500	Большая полуось эллипсоида, a = 2300; Малая полуось, b = 1530	33.5	120	1250	900	177.6	0.99
3	3000	Большая полуось эллипсоида, a = 4500; Малая полуось, b = 3000	254.5	195	1250	700	266.5	1.48

Примечание.

¹Длительность существования очага (τ) 60 тыс. лет.

²Вертикальное сечение тороида, ограниченного боковыми поверхностями изотерм 200 и 350°C и верхней и нижней горизонтальной плоскостью на глубине 0,9 и 4 км от уровня моря, площадь которого - 6 км²

³Тепло фонового геотермального распределения температур не учитывается.

Сложный профиль поверхности Земли над магматическим очагом Авачинского вулкана, включающий его вулканическую постройку заменялся при проведении расчётов на бесконечную горизонтальную пластину, лежащую над уровнем моря с теплофизическими характеристиками, идентичными характеристикам пород, вмещающих магматический очаг и близких к земной поверхности. При выборе мощности указанной пластины - 2 км принималось во внимание, что теплоизолирующее влияние на распространение тепла магматического очага оказывает в основном та часть бесконечной пластины, которая ограничена цилиндрическим диском с радиусом R м, совпадающим с радиусом изотермы 200°C на глубине центра магматического очага. При таком предположении естественно определить мощность пластины и соответственно высоту

диска так, чтобы среднеквадратичное отклонение высоты профиля поверхности Земли над и под плоскостью круга верхней стороны диска было минимальным (рис. 5,6).

При оценке верхней грани тепла, накопленного магматическим очагом во вмещающей его среде, используются геофизические данные, характеризующие его предполагаемые размеры. В публикациях прошлых лет можно найти оценки радиусов магматического очага Авачинского вулкана со сферической аппроксимацией формы радиусом 5 км [28] и 3,5 км [27]. В первом случае оценка радиуса очага давалась на основании геофизических данных, во втором случае – путём расчёта. Отметим, что оценка радиуса магматического очага по геофизическим данным была завышена, поскольку геофизическими методами [15] оценивали размер пластичной зоны, окружающей магматический очаг и отличающейся по скорости прохождения сейсмических волн от окружающих «хрупких» вмещающих пород. Слой пластичной зоны, непосредственно примыкающий к стенкам очага с расплавленной магмой, имеет температуру значительно меньшую температуры магмы в центре магматического очага. Температура на внешней оболочке пластичной зоны, окружающей магматический очаг, соответствует примерно 500°C. Изотерма с такой температурой проходит согласно нашим расчётам (рис.5-а) в горизонтальной плоскости на расстоянии 3,5 – 3,6 км от центра магматического очага, что существенно меньше 5 км. Возможно, что причина несоответствия в неполной адекватности модели плавления стенок очага, не учитывающей возможность образования и распространения радиальных трещин во всех направлениях. Трещины, возникающие при внедрении магмы в окружающие очаг породы, преимущественно в горизонтальном направлении заполняются расплавом магмы, увеличивая теплоотдачу во вмещающие породы. При этом ускоряется продвижение фронта плавления стенок очага. Создание новых, более адекватных моделей динамики роста и развития магматических очагов, должно устранить полностью или сократить некоторое несоответствие расчётных и экспериментальных результатов. В уже разработанных моделях роста и развития магматических очагов также возможна их корректировка, повышение степени их адекватности за счёт введения большего, эффективного коэффициента теплопроводности, избирательно действующего в зависимости от направления развития трещин. Однако здесь возникает проблема объективной оценки значения эффективной теплопроводности. Методы такой оценки в реальных условиях для вмещающих магматические очаги пород не разработаны.

Оценки тепла, накопленного во вмещающих очаг породах, проводились для тороида, образованного вращением вокруг вертикальной оси очага криволинейной трапеции (рис. 6). Тороид ограничен боковыми поверхностями изотерм 200 и 350°C и

верхней и нижней горизонтальной плоскостью на глубине 0,9 и 4 км от уровня моря, соответственно. Площадь этого вертикального сечения равна 6 км^2 (рис. 6). Выбор указанных изотерм определяется востребованностью интервала этих температур теплоносителя для производства электроэнергии. Положение нижней плоскости ограничивалось доступной и рациональной глубиной бурения. Объёмы магматических очагов и площади вертикальных сечений тороидов для сферической и эллиптической аппроксимации формы очага приняты одинаковыми. При расчётах распределения температур вокруг магматического очага предполагается, что это распределение носит кондуктивный характер. При этом учитывалось также кондуктивное охлаждающее влияние поверхности Земли за счёт введения зеркально симметричного относительно плоскости Земли очага тех же размеров.

Исходные данные и результаты расчётов для трёх вариантов аппроксимаций магматического очага Авачинского вулкана приведены в таблице. Первые две аппроксимации соответствуют сферической с радиусом 2 км и эллиптической форме очага с полуосями 1,53 и 2,3 км. Верхние кромки магматических очагов для сферической и эллиптической аппроксимации, согласно данным [15], находятся на уровне моря, а центры тяжести очагов располагаются соответственно на уровне 2 и 1,5 км. Форма очага эллипсоида с полуосями 2,3 и 1,53 км (вариант 2, табл.) более соответствует геофизическим представлениям о его форме [15]. Поэтому результаты расчётов тепловых ресурсов для размеров очага по варианту 2 следует принять за нижнюю оценку запасов тепла во вмещающих очаг породах. Третий вариант расчётов тепловых запасов (вариант 3, табл.) дает верхнюю оценку запасов тепла. Была также использована эллиптическая аппроксимация формы очага и при том же соотношении его малой и большой полуосей 1/1,5, но эллипсоид имел вертикальную и горизонтальную полуось соответственно 3 и 4,5 км. Большие размеры приняты по оценкам геофизических исследований [15]. Температура на стенке очагов со сферической формой и формой малого эллипсоида вращения была принята 900°C . Для большего очага с эллиптической формой температура стенки составляла 700°C (рис. 5). Способ построения тороида с поперечным сечением 6 км^2 для оценки запасов тепла оставлен прежним.

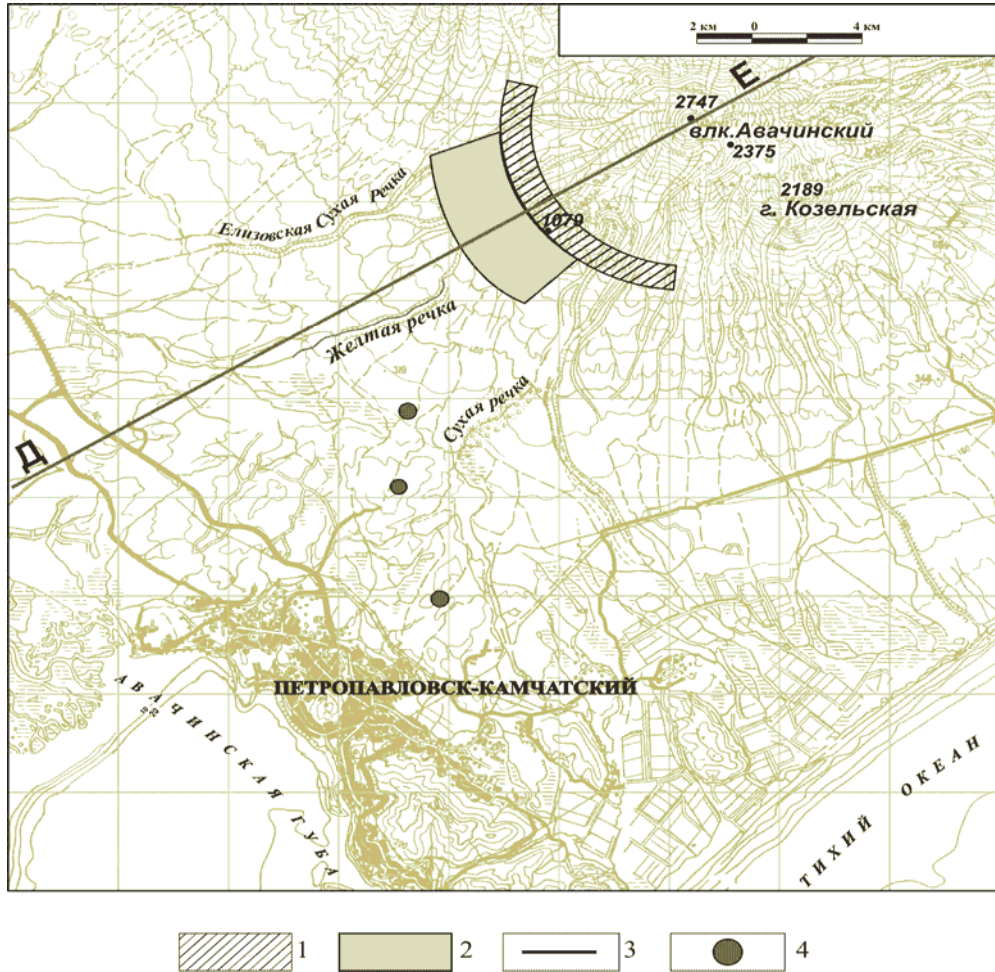


Рис. 7. Карта-схема района Авачинского вулкана с указанием предполагаемого места бурения глубоких скважин. 1 – проекция 100° сектора тороида вмещающих очаг пород с температурой $200 - 350^\circ\text{C}$. Сектор соответствует эллиптической аппроксимации формы магматического очага с размерами эллипсоида вращения вокруг вертикальной оси 1,5 и 2,25 км, соответственно; 2 - предполагаемое место бурения первой очереди глубоких скважин; 3 - линия сейсмопрофиля КМПВ (рис. 1); 4 - глубокие скважины (рис. 1).

На рис. 7 показан сектор тороида малого эллипсоида объемом в 50 км^3 в плане (в горизонтальной плоскости). В этом объеме, занимающем сектор 101° всего тороида, сосредоточено $0.24 \cdot 10^{20}$ Дж тепла. Для полных объемов тороидов, соответствующих большому и малому эллипсоиду очагов получены верхняя ($1,48 \cdot 10^{20}$ Дж) и нижняя грань ($0,86 \cdot 10^{20}$ Дж) оценок запасов тепла с заданным интервалом распределения температур $200 - 350^\circ\text{C}$, вмещающих магматический очаг пород. При расчётах принималось снижение температуры на 200°C . Тороиды, объёмы которых используются для оценки накопленного в них тепла, ограничены сверху и снизу горизонтальными плоскостями, проходящими на

глубинах 0,9 км и 4 км от уровня моря. Все тороиды расположены концентрично к магматическому очагу Авачинского вулкана.

Что касается запасов тепла собственно магматического очага Авачинского вулкана, то они составят $n \cdot 10^{20}$ Дж (для малого эллипсоида с полуосями 2,3 и 1,53 км – $0,7 \cdot 10^{20}$ Дж при снижении температуры от 900 до 150°C, для большого эллипсоида с полуосями 4,5 и 3,0 км – $4,1 \cdot 10^{20}$ Дж при снижении температуры от 700 до 150°C). Минимальные оценки почти соответствуют теплоотдаче магматического очага Авачинского вулкана $\sim 4,4 \cdot 10^7$ Вт, определенной в работе [17].

Очевидно, что запасы тепла достаточны для создания крупной системы геотермального тепло-электроснабжения (ГеоТС и ГеоЭС).

3. Схема возможного извлечения тепла накопленного магматическим очагом

Для извлечения тепла горных пород предполагается создание в границах приочаговой зоны искусственной подземной циркуляционной системы (подземного теплового котла), необходимой составной частью которой являются глубокие скважины и трещинные теплообменники. В нашей стране теоретические разработки такой технологии были выполнены учеными Киевского Института технической теплофизики и Санкт-Петербургского Горного института О.А. Кремневым, А.Н. Щербанем, Ю.Д. Дядькиным и др. Наиболее приемлемой является технологическая схема, при которой извлечение тепловой энергии проводится с помощью создания зоны искусственной трещиноватости. Вода, закачиваемая в котел через скважины, в процессе теплообмена с горными породами нагревается и затем извлекается на поверхность другими скважинами [7,31].

Отметим, что схема эксперимента, реализованного во Франции [32] по извлечению тепла горных пород путем нагнетания воды по скважинам в трещиноватую зону с последующим подъемом на поверхность полученного теплоносителя, в сущности, не отличается от схемы Ю.Д. Дядькина [7]. Экспериментальный проект по созданию системы Горячих Сухих Пород (HDR) в Сульц-су-Форе начал осуществляться с 1987 г. До 2001 г. работы носили чисто научный характер: это были разноплановые исследования и технические разработки для обоснования осуществимости проекта. Исследования проводились путем бурения скважины глубиной 2 км и последующих всесторонних ее испытаний, включая гидроразрыв пласта и опытную инжекцию. Пробуренные затем 3 скважины глубиной каждая около 5 км достигли температуры 200°C. Они были использованы для создания системы (триплета) из инжекционной и двух продуктивных скважин [35]. Проведенные испытания по гидроразрыву пласта и принудительной инжекции позволили осуществить замкнутую циркуляцию жидкости.

Распределение температур вокруг Авачинского магматического очага (рис. 5,6), позволяет оценить необходимую глубину бурения скважин до высокотемпературных зон (200 - 350°C) будущей подземной циркуляционной системы около 3.5 - 4 км от поверхности Земли. При радиусе магматического очага 5 км вертикальные скважины, как предлагалось в работах [28,36], должны располагаться на расстоянии 6-8 км к юго-западу от вулкана. Наклонные скважины, направленные в сторону очага и предназначенные для создания геотермальной циркуляционной системы, могут буриться на большем удалении – 7-9 км [39].

На первом этапе работ на Авачинском вулкане нужно пробурить параметрическую (исследовательскую) скважину, основной задачей которой является подтверждение существования термоаномалии в сфере влияния очага (приочаговой зоне). Естественно, при этом должен быть изучен геологический разрез, физические свойства пород, геотермические и гидрогеологические условия. В случае положительных результатов эта скважина может стать одной из скважин опытной (элементарной ячейки) будущей циркуляционной системы. Такая ячейка может состоять из одной нагнетательной одной или двух продуктивных.

На втором этапе, в зависимости от параметров первых скважин и требуемого количества теплоносителя, создается промышленная геотермальная циркуляционная система. Ее основные характеристики определяются потребностью в тепловой энергии, параметрами очага и производительностью скважин.

Для проведения бурения первых скважин предварительно намечается площадь в верховьях долин Елизовской Сухой, Желтой и Сухой речек (рис.7).

При снижении температуры во вмещающих очаг горных породах на 200°C и длительности эксплуатации подземной циркуляционной системы в течение 100 лет блок нагретых пород объемом 50 км³ может обеспечить получение 450-500 Гкал/час тепла, что почти полностью удовлетворит потребности г. Петропавловска-Камчатского. В варианте сооружения геотермальной электростанции (ГеоЭС) запасов тепла в объеме 50 км³ при названных выше условиях будет достаточно для получения около 250 МВт электроэнергии.

Объем в 50 км³ занимает менее 1/3 от объема тороида (рис.7), построенного вокруг меньшего эллиптического очага с вертикальной осью вращения с полуосями 2,3 и 1,53 км. Размер этого сектора может быть уменьшен, при сохранении того же количества накопленного тепла, если использовать более нагретый блок горных пород, расположенный ближе к магматическому очагу.

Для создания системы, способной обеспечить теплоэнергетические потребности г. Петропавловска-Камчатского, следует пробурить около 60 нагнетательных и добычных (вертикальных и наклонных) скважин глубиной 3,5 - 4 км. Такая оценка количества необходимых скважин получена на основе данных французских специалистов, использовавших скважины с производительностью циркуляционной системы в 15-25 кг/с. При этом предполагалось получение теплоносителя с теплосодержанием 800 - 850 кДж/кг.

Для функционирования геотермальной циркуляционной системы с целью теплоснабжения потребуется около 1000 л/с воды. Возможный ее источник - сток воды из бассейнов Сухих рек, в частности из бассейна Елизовской Сухой речки и ее левых притоков (рис. 7). Этот сток представляет собой талые воды, образующиеся из снега, фирна и льда, и жидкие осадки за теплое время года. По данным В.Н. Виноградова и Я.Д. Муравьева [6] для бассейна руч. Козельский, являющегося эталонным для района Авачинской группы вулканов, модуль поверхностного стока достигает 26 л/ км²с. Общий сток может быть на 50% больше, потому что вода фильтруется в рыхлые моренные и вулканогенные отложения и около половины от всего объема составляет подрусловой сток (устное сообщение Я.Д. Муравьева). По предварительным оценкам суммарная площадь водосбора Елизовской Сухой речки на замыкающем створе в районе возможного места бурения (высота 700 м над уровнем моря) составляет около 30 км². Суммарный сток можно оценить, таким образом, в 1200 л/с. С помощью несложных гидротехнических сооружений, например, на замыкающем створе из бассейна Елизовской Сухой речки, можно получить необходимое количество воды для организации снабжения водой буровых работ и циркуляционной системы.

Источником снабжения водой может быть также скважинный водозабор из грунтовых вод и подруслового стока, запасы и объем которых, как было сказано выше, достигает 50% поверхностного стока. Особенно эксплуатация скважинного водозабора будет важна в зимние месяцы.

4. Обсуждение применяемых методов и полученных результатов

Существование периферического магматического очага Авачинского вулкана показано многолетними геолого-геофизическими исследованиями. Дальнейшее изучение и достоверное подтверждение его существования возможно только с помощью глубокого бурения. Идея непосредственного проникновения в области, соприкасающиеся с вулканическим аппаратом, возникшая в 60-е годы прошлого века, может быть сейчас реализована. Это становится возможным благодаря достижениям в области глубокого

бурения, в том числе в высокотемпературных условиях. Вскрытие термоаномалий, изучение термодинамических условий в зоне влияния магматических очагов, испытания новых технологий открывают перспективы использования геотермальной энергии. Как известно магматические очаги, в том числе близповерхностные, по геолого-геофизическим данным выделяются на многих вулканах Камчатки [3, 27].

Оценка величины и доступности тепловых ресурсов является основной в проблеме использования магматических очагов вулканов. Решение задачи зависит от знания геометрической формы, размеров и глубины залегания магматического очага. Необходимо также иметь представление о том, как менялись эти параметры в прошлом, начиная от зарождения очага.

Различные представления о форме магматического очага одного и того же объёма дают заметно различные предпосылки и возможности использования тепла пород вокруг очага. Например, тороид нагретых пород, соответствующий малому эллиптическому очагу имеет больший радиус в плане (вариант 3, табл.), чем тороид, построенный вокруг сферического очага того же объёма, и поэтому при прочих равных условиях содержит больше тепла в заданных пределах глубин своего расположения. Кроме того, это позволяет разместить буровые вышки дальше от кратера вулкана на более пологих участках рельефа местности, возможно ближе к Петропавловску-Камчатскому, уменьшить глубину бурения скважин, укоротить подъездные пути и т.д. Поэтому вопрос об оценке формы магматического очага весьма актуален.

Аппроксимация магматического очага эллипсоидом predetermined данными геофизических исследований и представлениями об анизотропности вмещающих очаг пород. Теплопроводность трещиноватой среды вдоль трещин обычно существенно больше, чем в поперечном направлении [22]. Поэтому при эволюции роста и развития очага, если образование трещин вызвано сдвиговыми напряжениями, близкими к горизонтальным, скорость выплавления его стенок будет различна в вертикальном и горизонтальном направлениях [23,24,27], что приведёт к эллипсоидальности его формы. В данном случае это будет эллипсоид с горизонтальной (или слабо наклонённой к горизонту) осью вращения. Если вмещающие очаг породы обладают горизонтальной слоистостью, то напряжения, связанные с внедрением магмы при возникновении очага и его росте неизбежно вызывают систему радиальных горизонтальных трещин. В этом случае очаг также будет иметь форму вытянутого в горизонтальной плоскости эллипсоида, но уже с вертикальной осью вращения. Такие предпосылки эллипсоидальности формы магматического очага допускают соотношение вертикальной и горизонтальной полуосей эллипсоида очага примерно 1/1,5. Данные геофизических

исследований магматического очага Авачинского вулкана указывают на преимущественно вытянутую в горизонтальном направлении форму магматического очага [15] с соотношением полуосей аппроксимирующего очаг эллипсоида $3/5$. Приведённые выше соотношения длин полуосей примерно совпадают. Данные геофизических исследований на Авачинском вулкане не позволяют нам судить о преимущественном направлении вытянутости эллипсоида очага по азимуту в горизонтальной плоскости, поэтому в расчётах мы следуем выдвинутой выше гипотезе о причинах эллипсоидальности формы магматического очага, находящегося в слоисто-трещиноватой среде. Ось вращения при этом вертикальна.

Вопрос о возможности более точной аппроксимации формы магматического очага Авачинского вулкана в виде эллипсоида с близкой к горизонтали осью вращения или эллипсоида, не имеющего осей вращения, требует своего дальнейшего геофизического изучения. При этом необходимы специально разработанные, ориентированные для решения этой проблемы средства, методы и приёмы. Одно из возможных направлений исследований, предназначенных для решения этой задачи, - измерение плотности теплового потока в десятках неглубоких скважин на расстояниях 2-5 км от кратера вулкана с последующим решением обратной тепловой задачи для уточнения размеров магматического очага

Для достоверной оценки тепла нагретых окружающих очаг пород необходимо оценить глубину прохождения изотерм, огибающих верхнюю более доступную для бурения полусферу очага. Для достижения этой цели важно достаточно точно оценить в соответствии с геофизическими данными [15] положение верхней кромки магматического очага и использовать эти данные, как базу для отсчёта центра тяжести и, при необходимости, других вертикальных размеров, характеризующих положение очага в пространстве вмещающих пород. Это правило выполнялось нами каждый раз в расчётах, в которых варьировались различные геометрические формы и размеры магматического очага. При таком подходе результаты расчётов, используемые для оценок ресурсов накопленного тепла на одних и тех же глубинах сравнимы. По той же причине важно уделять особое внимание точной оценке положения в первую очередь верхней кромки магматического очага, получаемой различными геофизическими методами. Для этого целесообразно разработать дополнительно специальные инструментальные средства, используя особенности свойств, состава материалов, скапливающихся под верхним сводом магматического очага, физические процессы, происходящие в этой его части. Для энергетического использования наиболее интересны магматические очаги, верхняя кромка которых находится на глубине 2 км и выше. На этой глубине в магме очага

происходит отделение растворённых в ней газов. В результате образуется газовая подушка, которую можно рассматривать, как резонатор с высокой добротностью [5, 20, 21]. Возбуждение колебаний на собственных частотах резонатора и оценка их амплитуды даёт информацию о многих параметрах магматического очага, в том числе о его размерах и положении в пространстве окружающих пород.

При расчете запасов тепла не учитывается охлаждение вулканической постройки метеорными водами. Тепло магматического очага, отдаваемое им во вмещающие породы с учётом его конвективного обтекания флюидами, не может быть меньше кондуктивного тепла. Кроме того, общее количество тепла, накопленного магматическим очагом во вмещающих породах за время своего существования за счёт кондуктивного теплопереноса, никак не может быть больше реального, учитывающего все факторы, определяющие теплоотдачу очага. Поэтому, исходя из представлений о кондуктивном способе распространении тепла, мы рассчитываем нижнюю грань оценки накопленного магматическим очагом тепла.

Конвекционное обтекание магматического очага флюидами только увеличивает его теплоотдачу. Если интенсивность обтекания флюидами магматического очага вызвана только тепловым влиянием самого очага, и среда вокруг очага на большом расстоянии от его центра однородна, то скорости флюидного обтекания в период его квазистационарного состояния сравнительно невелики. В этот период вмещающие породы уже прогреты на большую глубину и градиенты температур в них также не велики. Тогда влияние фактора внешнего обтекания очага флюидами не должно сильно сказываться на теплоотдаче очага. Оценки, полученные нами, по-видимому, близки к действительным. Рассчитанные изотермы распределения температур, основанные на представлении о кондуктивном характере теплопередачи от магматического очага к окружающим его породам, указывают на 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.

Современными геофизическими методами, при использовании доступной для изысканий аппаратуры по многим разным причинам трудно достаточно точно установить геометрические размеры и форму очага. Например, трудно отличить аномальные трещиноватые зоны, заполненные относительно холодным рассолом от магматического очага, заполненного разогретой магмой. Без достаточно глубоко пробуренных скважин невозможно точно определить плотность пород в нужных объёмах. Входные данные,

полученные после бурения первых скважин необходимо использовать для повторных уточнённых расчётов и оценок тепловых ресурсов.

В данной работе проблеме использования накопленного тепла сухих горных пород уделено основное внимание. Вместе с тем в среде, окружающей магматический очаг Авачинского вулкана, геофизиками обнаружена примыкающая к очагу, возможно заполненная рассолом, трещиноватая зона большого объёма (240 км³) [15]. В работе [38] высказано предположение о формировании в конусе вулкана над магматическим очагом геотермального резервуара. Предположение основывается на анализе динамики фумарольной активности и распределения координат роя землетрясений в пределах постройки Авачинского вулкана. Возможность получения природного теплоносителя в зоне нагретых пород делает постановку глубокого бурения более перспективной и рентабельной для последующего извлечения более дешевого тепла. В этом отношении работы на Авачинском вулкане сближаются с целями и задачами глубокого бурения в районе Мутновского вулкана и эксплуатирующегося Мутновского геотермального месторождения [18].

В сложной проблеме глубокого бурения на Авачинском вулкане и извлечения накопленного тепла следует отметить вопрос о вулканической опасности. Катастрофические взрывы, тефра, лавовые потоки, лахары, и др. опасные проявления, так или иначе отмеченные на этом вулкане в прошлом, имеют различные показатели по силе воздействия, последствиям, а также вероятности возникновения в общем и в разных точках рельефа постройки и подошвы вулкана в частности [1,13,14].

Учитывая это, очевидно, что место для размещения капитальных сооружений системы геотермального энергоснабжения (ГеоЭС, ГеоТС) следует выбирать с учетом возможной активизации деятельности вулкана.

Вероятность катастрофических взрывов на Авачинском вулкане, таких, какие имели место в прошлом тысячи и десятки тысяч лет назад [1], не следует исключать, но такое явление гораздо менее вероятно, чем сильные землетрясения силой 7-9 баллов в районе города Петропавловска–Камчатского и его окрестностей.

Выводы

1. Данные геологических и геофизических исследований, в том числе последних лет, свидетельствуют о наличии не застывшего магматического очага под Авачинским вулканом и позволяют приблизительно оценить глубину его залегания и весьма приблизительно форму и размеры. По современным представлениям магматический очаг Авачинского вулкана имеет форму эллипсоида с соотношением длин вертикальной и

горизонтальной полуоси примерно - 1/1,5. Ключевой параметр, - положение верхней кромки магматического очага оценивается различными исследователями по разному в пределах интервала от нулевой отметки уровня моря и не ниже 2 км от этого уровня. Выполненные расчеты показывают, что размер горизонтальной и вертикальной полуосей не меньше 2,3 и 1,53 км, соответственно, при температуре стенки очага $T_2 = 900^\circ\text{C}$. Геофизические исследования дают оценку горизонтальной полуоси разогретой пластичной зоны эллипсоида – 5 км и 3,5 км её наиболее разогретой части. Т.о. верхняя грань оценки размеров эллипсоида магматического очага принята: большая полуось эллипсоида $a = 4,5$ км, малая полуось $b = 3$ км. При таких размерах температура стенки очага $T_2 = 700^\circ\text{C}$.

2. Количество тепла в магматическом очаге Авачинского вулкана при эллиптической аппроксимации его формы составляет: для малого эллипсоида (с полуосями 1,53 и 2,3 км) при снижении температуры от 900 до 150°C составляет $0,7 \cdot 10^{20}$ Дж, для большого эллипсоида (с полуосями 3 и 4,5 км) при снижении температуры от 700 до 150°C равно $4,1 \cdot 10^{20}$ Дж.

3. Запасы тепла, накопленного очагом во вмещающих породах от начала зарождения до наших дней (60 тыс. лет) в объеме тороида, ограниченного боковыми поверхностями изотерм 200 и 350°C и верхней и нижней горизонтальной плоскостью на глубине 0,9 и 4 км от уровня моря, составляют: для сферической формы очага – $0,86 \cdot 10^{20}$ Дж, для эллипсоида вращения с полуосями 2,3 и 1,53 км – $0,99 \cdot 10^{20}$ Дж, для эллипсоида вращения с полуосями 4,5 и 3,0 км – $1,48 \cdot 10^{20}$ Дж. При оценке накопленного тепла вмещающих пород снижение температуры принималось - 200°C . Результаты расчётов тепловых ресурсов тороида малого эллипсоида очага приняты за нижнюю грань оценки тепловых запасов нагретых вмещающих очаг пород.

4. Геолого-геофизические предпосылки существования периферического магматического очага Авачинского вулкана и нагретых пород в сфере его влияния, содержащих громадные запасы накопленного тепла, позволяют ставить проблему создания геотермальной циркуляционной системы как реальную задачу извлечения тепловой энергии вулкана для тепло- и электроснабжения г. Петропавловска-Камчатского.

При длительности эксплуатации подземной циркуляционной системы в течение 100 лет блок нагретых пород в объеме 50 км^3 может обеспечить приблизительно получение 450-500 Гкал/час тепла или получение около 250 МВт электроэнергии. Такой объем пород заключен в 1/3 части выделенного тороида, длина которой 8-10 км.

5. Первая (параметрическая) скважина, предназначенная для подтверждения существования термоаномалии приочаговой зоны, относится по своей сути к научному

бурению, в ходе выполнения которого должны быть проведены разноплановые исследования и технические разработки для обоснования осуществимости извлечения тепловой энергии сухих горных пород.

6. Извлечение тепла и производства электричества при использовании горячих сухих пород, окружающих магматический очаг Авачинского вулкана, может стать одной из основ энергетики Камчатки. Опыт такого проекта важен для дальнейшего развития геотермальной энергетики в России и в мире в период сокращения запасов органического топлива.

Авторы благодарят Б.Г. Поляка за сделанные в процессе подготовки рукописи к печати полезные замечания и советы, а также Я.Д. Муравьева за предоставление фотографии Авачинского вулкана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 05-05-64021, № 05-05-64730, № 05-05-64154, 06-08-08169), а также Программы 16 фундаментальных исследований Президиума РАН (проект 2.7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базанова Л.И., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д.* Катастрофические извержения Авачинского вулкана (Камчатка) в голоцене: хронология, динамика, геолого-геоморфологический и экологический эффекты, долгосрочный прогноз //Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 15 - 20.
2. *Балеста С.Т.* Дифракция сейсмических волн на очаге и строение и состояние вещества магматического очага Авачинского вулкана. Бюл. вулканол. станций, № 46, 1970, С. 3-8.
3. *Балеста С.Т.* Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.:Наука, 1981, 134 с.
4. *Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А., Пушкарёв В.Г., Сеньюков С.Л.* Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) //Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 43-55.
5. *Богати́ков О.А., Залиханов М.Ч., Карамурзов Б.С., Гурбанов А.Г. и др.* Природные процессы на территории Кабардино-Балкарии. Издательская группа Центра инновационных проектов ИГЕМ РАН. Москва-Нальчик. 2004. С. 257-270.
6. *Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д.* Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов). М.: Гидрометеиздат, 1991, 119 с.
7. *Дядькин Ю.Д.* Основы геотермальной технологии. Ленинград, 1985. 176 с.
8. *Зубин М.И., Козырев А.И.* Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) //Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 81-94.
9. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твёрдых тел. М.:Наука. 1964. 487 с.
10. *Кожемяка Н.Н.* Действующие вулканы Камчатки: типы построек, длительность формирования, общий объем, продуктивность, состав вулканитов //Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 3 - 16.
11. *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.
12. *Масуренков Ю.П., Егорова И.А., Пузанков М.Ю., Балеста С.Т., Зубин М.И.* Вулкан Авачинский. Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука. 1991. Т.2. С.246-273.
13. *Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И.* Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке. Часть I.//Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С.13 - 27.

14. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке. Часть II. //Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С.3-24.
15. Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке //Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3-10.
16. Поляк Б.Г. О характере геотемпературного поля в районе Авачинского вулкана //Докл. АН СССР. 1964. Т.154. № 2. С. 329-332. Поляк Б.Г. Геотермические особенности области современного вулканизма. М.:Наука, 1966, 180 с.
17. Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В. Продуктивность вулканических аппаратов //Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 22 - 37.
18. Потанов В.В. Физическая модель тепломассопереноса в магматогенной геотермальной системе под вулканом Мутновский //Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 21-29.
19. Смирнов Я.Б., Сугробов В.М., Яновский Ф.А. Земной тепловой поток Камчатки //Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 41-65.
20. Собисевич А.Л. О формировании низкочастотных наведенных волновых процессов в слоистых средах с неоднородностями. /Современные методы геолого-геофизического мониторинга природных процессов на территории Кабардино-Балкарии. //Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики. Москва-Нальчик. 2005. С.120-127.
21. Собисевич А.Л., Руденко О.В. О резонансных свойствах магматических структур. /Современные методы геолого-геофизического мониторинга природных процессов на территории Кабардино-Балкарии. //Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики. Москва-Нальчик. 2005. С.75-82.
22. Справочник физических констант горных пород. М.: Мир. 1969. 544 с.
23. Уткин И.С., Федотов И.С., Уткина Л.И. Об эволюции и размерах магматических очагов вулканов //Вулканология и сейсмология. 1999. № 3. С. 7–18.
24. Уткин И.С., Федотов С.А., Делемень И.Ф., Уткина Л.И. Динамика роста и развития проточных магматических очагов Мутновско–Гореловской группы вулканов, их тепловые поля и накопленное ими подземное тепло //Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 11-29.
25. Федотов С.А. О входных температурах магм, образовании, размерах и эволюции магматических очагов вулканов //Вулканология и сейсмология. 1980. № 4. С 3-39.

26. *Федотов С.А.* Расчёт питающих каналов и магматических очагов вулканов, имеющих устойчивые размеры и температуру //Вулканоология и сейсмология. 1982. № 3. С 3-17.
27. *Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
28. *Федотов С. Д., Балеста С. Т., Дрознин В. А., Масуренков Ю.П., Сугробов В.М.* О возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана //Бюл. вулканол. станций. 1977. № 53. С. 27-37.
29. *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 //Вулканоология и сейсмология. 2000. № 3.С. 3-13.
30. *Штейнберг Г.С., Зубин М.И.* О глубине залегания магматического очага под Авачинским вулканом. //Докл. АН СССР. 1963. Т.152. № 4. С.
31. *Щербань А.Н., Бабинец А.Е., Цырульников А.С., Дядькин Ю.Д.* Тепло Земли и его извлечение. Киев: Наукова думка, 1974. 264 с.
32. *Baumgärtner, J., Jung, R., Gerard, A., Baria, R., Garnish, J.* The European HDR project at Soultz-sous-Forêts; stimulation of the second deep well and first circulation experiments. In: 21st Workshop on Geothermal reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California. 1996. p.
33. *Baumgartner J., Teza D., Hettkamp T., Homeier G., Baria R. and Michelet S.* (2005). Electricity Production from Hot Rocks. World Geothermal Congress 2005. P.
34. *Dezayes, C., Genter, A., Gentier, S.* Fracture network of the EGS geothermal reservoir at Soultz-sous-Forêts (Rhine Graben, France). In: Geothermal Resources Council **28**. GRC Transaction, Palm Springs, California, USA, 2004. p. 213-218.
35. *Dezayes Ch., Genter A and Hooijkaas G.R.* Deep-Seated Geology and Fracture System of the EGS Soultz Reservoir (France) based on Recent 5km Depth Boreholes. //Proceedings World Geothermal Congress. 2005. p.
36. *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
37. *Kaieda H., Ito H., Kiho K., Suzuki K., Suenaga H., Shin K.* Review of the Ogachi HDR Project in Japan. //World Geothermal Congress 2005. p.
38. *A.V.Kiryukhin, I.K.Dubrovskaya, N.I. Kiryukhina.* Modeling study of the Avachinsky volcano cone hydrothermal eruption conditions //Abstracts Week A, XXIII General

Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Sapporo, Japan, June 30 - July 11. 2003. 564 p.

39. *Povarov O.A., Sugrobov V.M.* Heat and electricity from Hot Dry Rocks of Avachinsky Volcano for the Center of Kamchatka //Newsletter of the International Geothermal Association, IGA NEWS, 2006, No. 63. p. 6-7.
40. *Rummel, F., Baumgärtner, J.* Hydraulic fracturation measurements in the GPK1 borehole, Soultz-sous-Forêts. In: Geothermal Energy in Europe. The Soultz Hot Dry Rock Project (edited by Bresee, J. C.) **3**. Gordon and Breach Science Publishers. 1991. p. 119-148.