

Р.И. Пашкевич, Д.В. Мамаев, К.А. Павлов

**ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
АВАЧИНСКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
С УЧЕТОМ ДАННЫХ ТЕРМОМЕТРИИ
И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ**

Представлены результаты численного термогидродинамического моделирования Авачинской геотермальной системы. Модель основана на имеющихся геолого-геофизических данных. Установлены прогнозные температуры и местоположения участков горных пород системы, перспективных для промышленного освоения.

Ключевые слова: Авачинская геотермальная система, конвективный теплоперенос, термогидродинамическая модель, численное моделирование.

1 Введение

В 2015 г. НИГТЦ ДВО РАН выполнялись научно-исследовательские работы по исследованию Авачинской геотермальной системы [5]. В состав работ были включены термометрическая съемка участка системы [6] и обработка тепловизионных данных космического снимка участка [9]. В 2011 г. выполнялось аудиомагнитотеллурическое зондирование (АМТЗ) в южном секторе Авачинской геотермальной системы [8]. Установлено, что температуры в термометрических скважинах, градиенты теплового излучения по данным обработки космоснимка и удельных сопротивлений по данным АМТЗ качественно соответствуют друг другу [17]. Зоны локализации повышенной температуры в скважинах соответствуют зонам пониженного градиента теплового излучения по данным космоснимка и зонам пониженного сопротивления по данным АМТЗ [17]. Последние зоны, с учетом геологических данных, были интерпретированы как разломная зона [5]. На основе этой информации ранее разработанная численная термогидродинамическая модель Авачинской геотермальной системы [7] была модифицирована [5]. Участки разломной зоны в вертикальном разрезе, соответствующие низким сопротивлениям, были учтены в модифицированной модели как домены с высокой проницаемостью [5].

Целью настоящей работы является представление данных, полученных с помощью разработанной модифицированной термогидродинамической модели.

2. Краткая характеристика объекта

Авачинский вулкан является действующим с верхнего плейстоцена и относится к типу Сомма-Везувий. Вулкан располагается в вулcano-тектонической депрессии мел-палеогенового фундамента. Высота постройки вулкана 2750 м, объем 100 км³, возраст 60 тыс. лет. Последние 3500 лет формируется молодой конус вулкана, проявляющий активную фумарольную деятельность. Естественные выходы тепла в кратере конуса представлены прогретыми участками, парящими площадками и фумаролами. На дне кратера температура пород в местах выходов вулканических газов превышала 700°C в 1977 г.. Общая мощность тепловой разгрузки оценивается в 75 МВт [11].

3. Разработка модели магматогенной геотермальной системы

Численная модель реализована на базе программного комплекса (ПК) HYDROTHERM, предназначенного для трехмерного моделирования многофазного потока воды и тепла в проницаемых средах в диапазоне температуры и давления, соответственно 0–1200°C и 0,05–1000 МПа, включающей область существования воды в надкритическом состоянии.

Математическая модель в HYDROTHERM основывается на системе уравнений сохранения массы и энергии, выраженных через величины давления и энтальпии. Использование давления и энтальпии в качестве зависимых переменных однозначно определяет термодинамическое состояние флюида и в одно- и в двухфазном состоянии и, кроме того, позволяет избежать вычислительные трудности в окрестности критической точки воды, включая сингулярность теплоемкости и расхождение частных производных плотности [14]. Уравнения сохранения массы и энергии формулируются в HYDROTHERM в консервативной форме [14, 15].

В модели приняты следующие упрощения: флюид является чистой водой; справедлив обобщенный закон Дарси; капиллярными эффектами можно пренебречь; относительные проницаемости являются функциями насыщения водой, не имеющими гистерезиса; порода и вода находятся в локальном термодинамическом равновесии; теплопередачей, дисперсией и излучением можно пренебречь; пористость линейно зависит от

давления; энтальпия породы линейно зависит от температуры; пористость, абсолютная проницаемость и теплопроводность могут изменяться во времени и пространстве, плотность и теплоемкость пород являются постоянными величинами.

Вычислительная сетка разработана в препроцессоре ПК HYDROTHERM [14], визуализация результатов выполнена в ПК TESPLOT [16].

На основе интерпретации данных геологического и геофизических разрезов была разработана трехмерная численная модель, включающая 9 доменов (слоев пород) и магматический очаг (рис. 1). Использовалась нерегулярная сетка с размерами наиболее мелких блоков 300×300 м в области непосредственной близости к очагу, дневной поверхности и зонам повышенной проницаемости.

В плане модель ограничена прямоугольником площадью $288,6 \text{ км}^2$ (рис. 3, 4), глубина с учетом постройки вулкана — 8 км. Модель состоит из 55125 блоков. Границы модели заданы непроницаемыми, толщиной по 50 м.

4. Начальные и граничные условия в модели

В начальный момент времени в окружающих очаг породах задавался средний геотермический градиент $30^\circ\text{C}/\text{км}$ и гидростатическое распределение давления флюида. На верхней границе модели задавались постоянная температура 10°C и атмосферное давление, на нижней границе — постоянный тепловой поток $120 \text{ мВт}/\text{м}^2$. На боковых границах области моделирования задавалось условие отсутствия потока флюида. Температура стенки магматического очага задавалась равной 1000°C . Разрезы модели представлены на рис. 1 и 2.

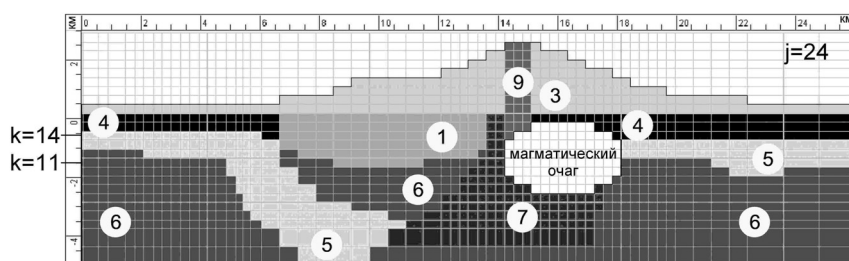


Рис. 1. Разрез модели по оси x через центр магматического очага. Цифрами в кружках обозначены номера доменов (пород); в правом верхнем углу — номер разреза (рис 3, 4); k — номер разреза по оси z . Показана вычислительная сетка

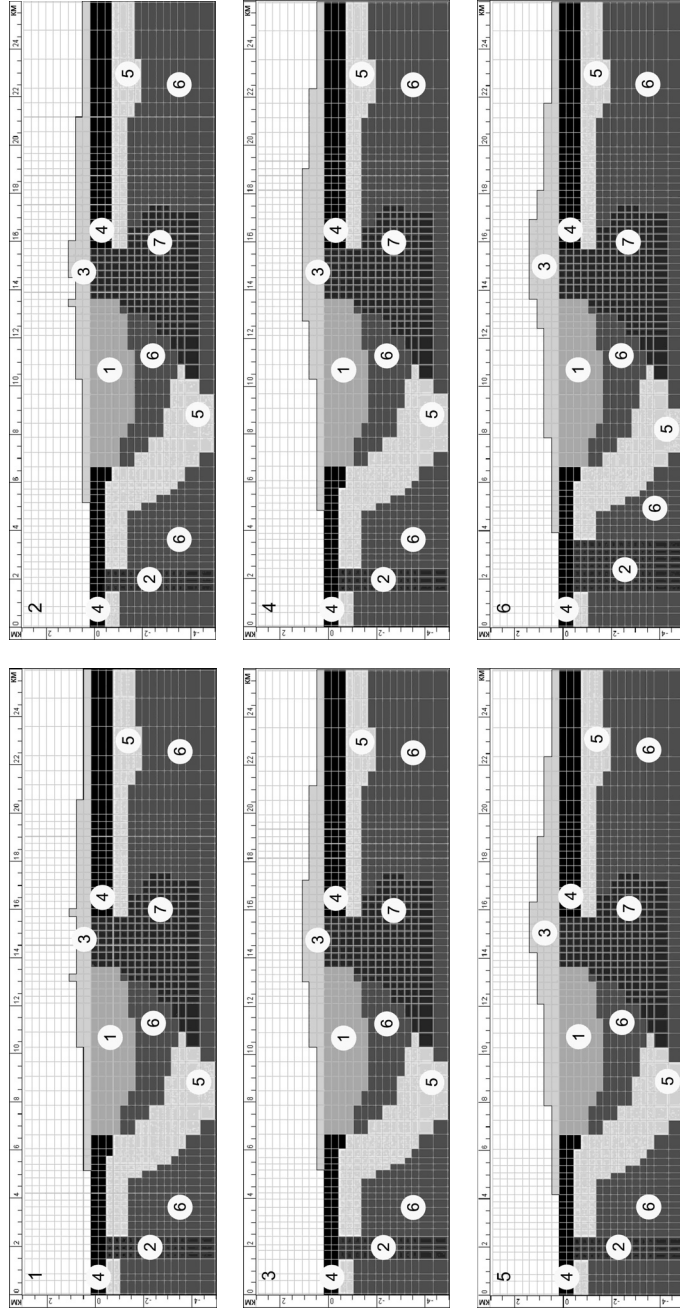
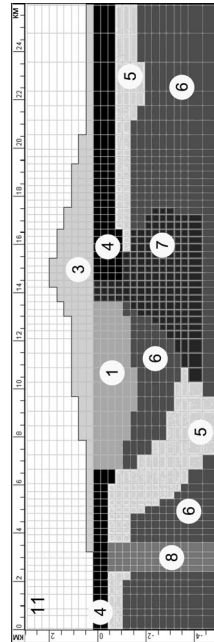
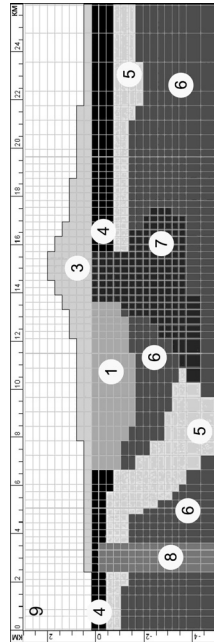
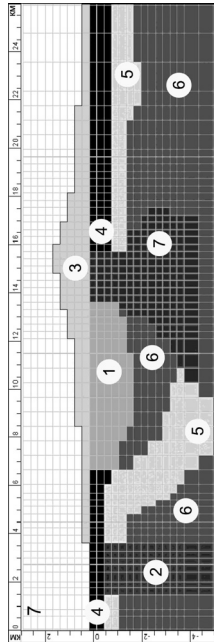
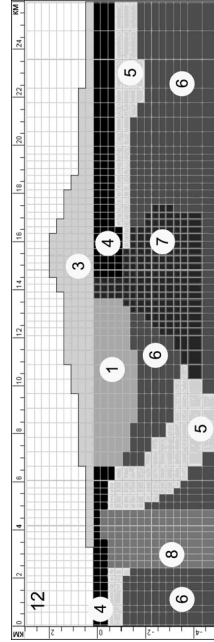
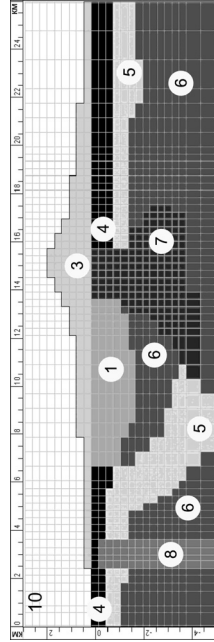
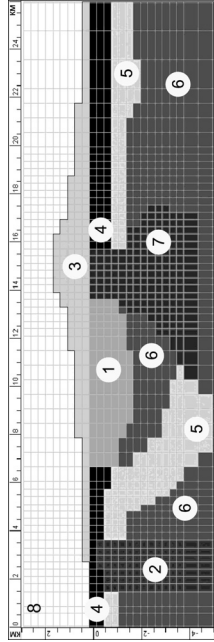
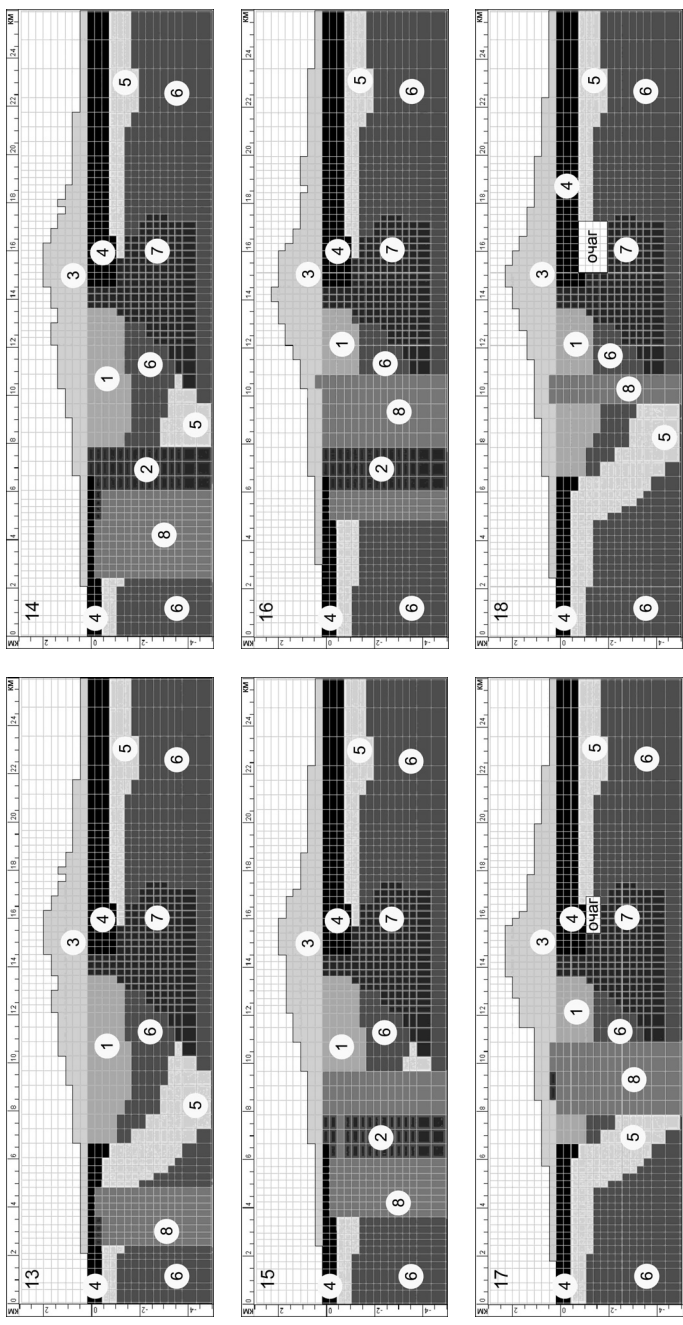


Рис. 2. Разрезы модели по оси х. В верхнем левом углу показаны номера разрезов (рис. 3, 4)



Продолжение рис. 2



Окончание рис. 2

5. Параметры магматического очага и вмещающих его пород

В [10] рассматривается тепловой баланс магматического очага и питающего его канала для нахождения соотношения между размером, температурой и расходом магмы очага. По комплексу известных данных и приняв тепловой режим Авачинского вулкана квазистационарным, в [10] были рассчитаны зависимости температуры втекающей в очаг магмы и температуры стенок магматического очага при различных значениях радиуса периферического очага. Температура втекающей в очаг магмы принималась в диапазоне 1020-1200°C, температура периферического очага – 900 и 1000°C. Наиболее допустимое значение среднего радиуса очага составило не более ~ 2,2 км. При объеме вулкана в 100 км³ максимально возможный радиус очага оказался равным 4,2 км. При размере горизонтальной полуоси в 5,2 км, полученном геофизическими методами, объем очага равен ~240 км³. Данная верхняя оценка радиуса представляется чрезмерно завышенной. Нижние оценки 2,6–3,6 км близки к значениям, полученным в [10] при тепловых расчетах.

В [12] на основе обобщения данных геологических и геофизических исследований был сделан вывод, что магматический очаг имеет форму эллипсоида с соотношением длин вертикальной и горизонтальной полуоси примерно – 1/1,5 и имеют размеры не меньше 1,53 и 2,3 км, соответственно, при температуре стенки очага 900°C. Геофизические исследования дают оценку горизонтальной полуоси разогретой пластичной зоны эллипсоида – 5 км и 3,6 км ее наиболее «разогретой» части [1].

В численных экспериментах магматический очаг задавался в форме вертикального эллипсоида вращения с полуосями 2,25 км и 1,5 км. Это соотношение длин полуосей (1/1,5) соответствует выводам работы [12]. Заданные значения полуосей можно считать нижней гранью оценки размера магматического очага Авачинского вулкана. Температура стенки очага была принята равной 1000°C. Гидрогеологические и теплофизические характеристики пород, принятые при моделировании, по результатам анализа данных работ [2, 13], сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения проницаемостей доменов в модели

| № домена | 1 | 2* | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8** | 9 |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Проницаемость, м ² | $3 \cdot 10^{-15}$ | $1 \cdot 10^{-14}$ | $1 \cdot 10^{-15}$ | $1 \cdot 10^{-18}$ | $1 \cdot 10^{-18}$ | $1 \cdot 10^{-18}$ | $5 \cdot 10^{-18}$ | $3 \cdot 10^{-14}$ | $1 \cdot 10^{-16}$ |
| Пористость | 0.05 | 0.07 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.07 | 0.05 |
| Плотность, кг/м ³ | 2600 | 2650 | 2600 | 2500 | 2650 | 2700 | 2700 | 2650 | 2600 |
| Теплопроводность, Вт/м·К | 2.0 | 2.7 | 1.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.0 |
| Теплоемкость, кДж/кг·К | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| <i>Примечания.</i> * — домен, моделирующий разломную зону; ** — домен с высокой проницаемостью. | | | | | | | | | |

В табл. 2 представлены геологические характеристики пород Авачинской магматогенной геотермальной системы, принятые для доменов термогидродинамической модели по результатам анализа данных работы [4]. На нижних блоках модели в домене с высокой проницаемостью 8 (рис. 3, 4 (см. стр. 314)) заданы источники теплоносителя с суммарным расходом 15 кг/с и температурой 370°C, соответствующей температуре насыщения при гидростатическом давлении на соответствующей глубине.

Домен 1 выделен в модели в качестве повышенно-трещиноватой области на основе данных по распределению эпицентров землетрясений за периоды 1994 и 1997 гг. [3]. Проницаемость среды принята одинаковой во всех направлениях (изотропной). Значения проницаемости доменов модели, принятые при моделировании сведены в табл. 1.

6. Анализ результатов.

Вокруг очага, за исключением верхней его части, развивается зона конвекции надкритического флюида (рис. 5–7). Вблизи поверхности очага образуется область перегретого пара шириной около 1 км. Вследствие высокого гидрогазодинамического сопротивления пород постройки периферийная область влажного пара отсутствует.

Магматический очаг оказывает значительное влияние на температурное поле в породах системы на расстоянии около 5 км. На удалении 12–14 км от очага температурное поле в породах соответствует региональному геотермальному градиенту, что согласуется с данными [4], полученными по результатам замеров температур в скважине ГК-2а, находящейся в 14 км от Авачинского вулкана.

В зоне высокой проницаемости (домен 8) развивается интенсивная конвекция теплоносителя (рис. 5–7). По данным моделирования область горных пород с температурой 160–200°C может располагаться на глубине 1,0–2,0 км от дневной поверхности и на удалении 10–12 км от центра очага. Повышенная проницаемость пород постройки вулкана оказывает охлаждающий эффект, что обуславливает «придавливание» изотерм над очагом. Аналогичный эффект наблюдается на границе приочаговой зоны и области повышенной трещиноватости.

7. Заключение

В результате численного моделирования получены следующие выводы.

1. Вблизи поверхности магматического очага Авачинской геотермальной системы может быть расположены область теплоносителя в надкритическом состоянии и область перегретого пара.

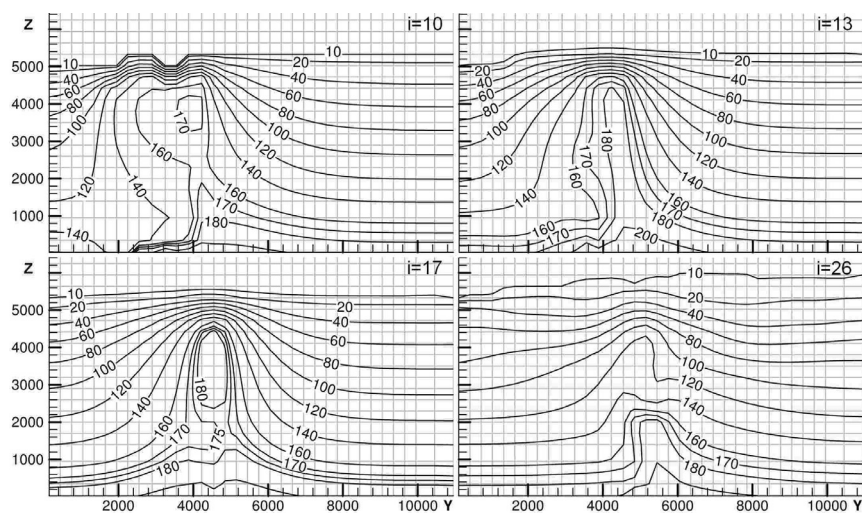


Рис. 5. Распределение температуры на момент времени 60 тыс. лет в разрезах по оси у. В правом верхнем углу – номер разреза (рис. 3, 4)

72 Таблица 2

Геологические характеристики пород Авачинской магматогенной геотермальной системы, принятые для доменов термогидродинамической модели

| № домена модели | Система** | Название отдела, серия** | Породы** |
|-----------------|---------------------------|--|--|
| 1* | Палеогеновая и неогеновая | Верхний миоцен-плиоцен Алнейская серия | Андезиты, базальты их туфы и туффиты |
| | Меловая | Ирунейская свита | Кремнистые сланцы алевропелитовые, псаммитовые, туффиты, туфы, порфириты |
| 2 | Меловая | -(-) | -(-) |
| 3 | Меловая | Хозгонская свита | Рассланцованные песчаники, филлиты |
| | Четвертичная | Современный средний и верхний | Андезиты, базальты и их туфы |
| 4 | Палеогеновая и неогеновая | Верхний миоцен-плиоцен. Алнейская серия | Андезиты, базальты их туфы и туффиты |
| | Меловая | Ирунейская свита | Кремнистые сланцы алевропелитовые, псаммитовые, туффиты, туфы, порфириты |
| 6 | Меловая | Хозгонская свита | Рассланцованные песчаники, филлиты |
| | -(-) | -(-) | -(-) |
| 7 | -(-) | -(-) | -(-) |
| | -(-) | Ирунейская свита | Кремнистые сланцы алевропелитовые, псаммитовые, туффиты, туфы, порфириты |
| 8 | -(-) | Хозгонская свита | Рассланцованные песчаники, филлиты |
| | -(-) | Современный средний и верхний | Андезиты, базальты и их туфы |
| 9 | Четвертичная | Современный средний и верхний | Андезиты, базальты и их туфы |

Примечания. * — зона с эпицентрами землетрясений за периоды 1994 г. и 1997 г. [3]; ** — по данным Овчеренко В.В. и др. [4].

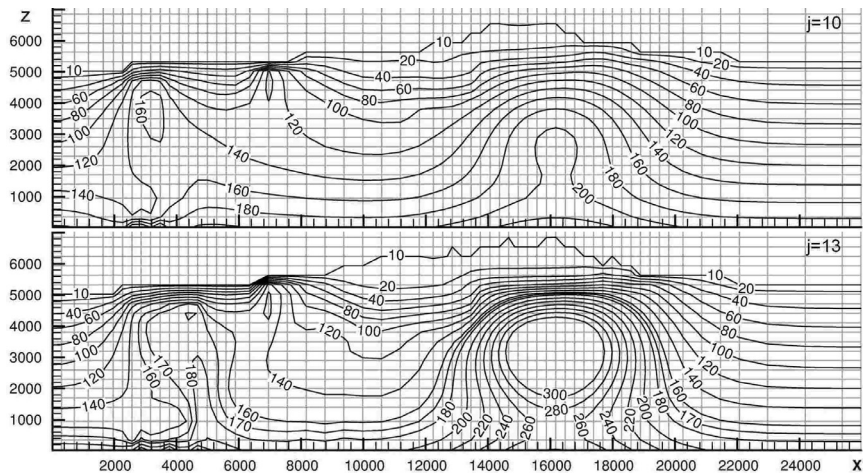
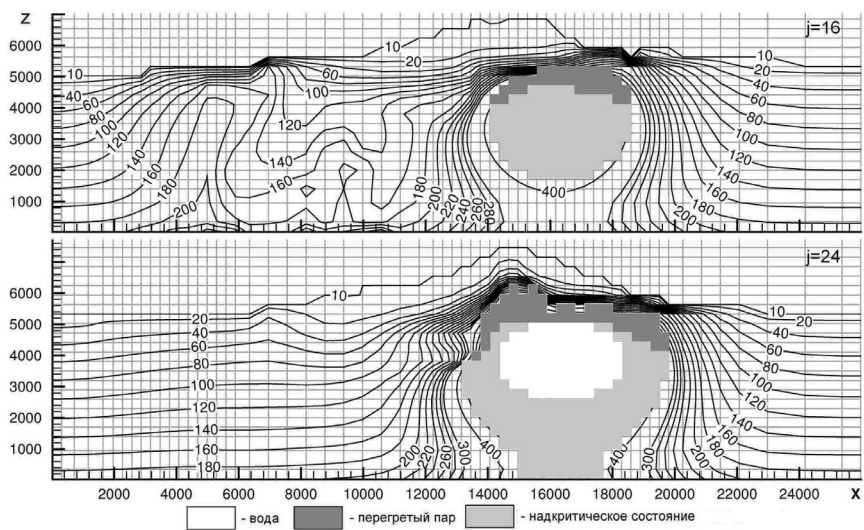


Рис. 6. Распределение температуры и фазового состояния на момент времени 60 тыс. лет в разрезах по оси x. В правом верхнем углу - номер разреза (рис. 3, 4)



Окончание рис. 6

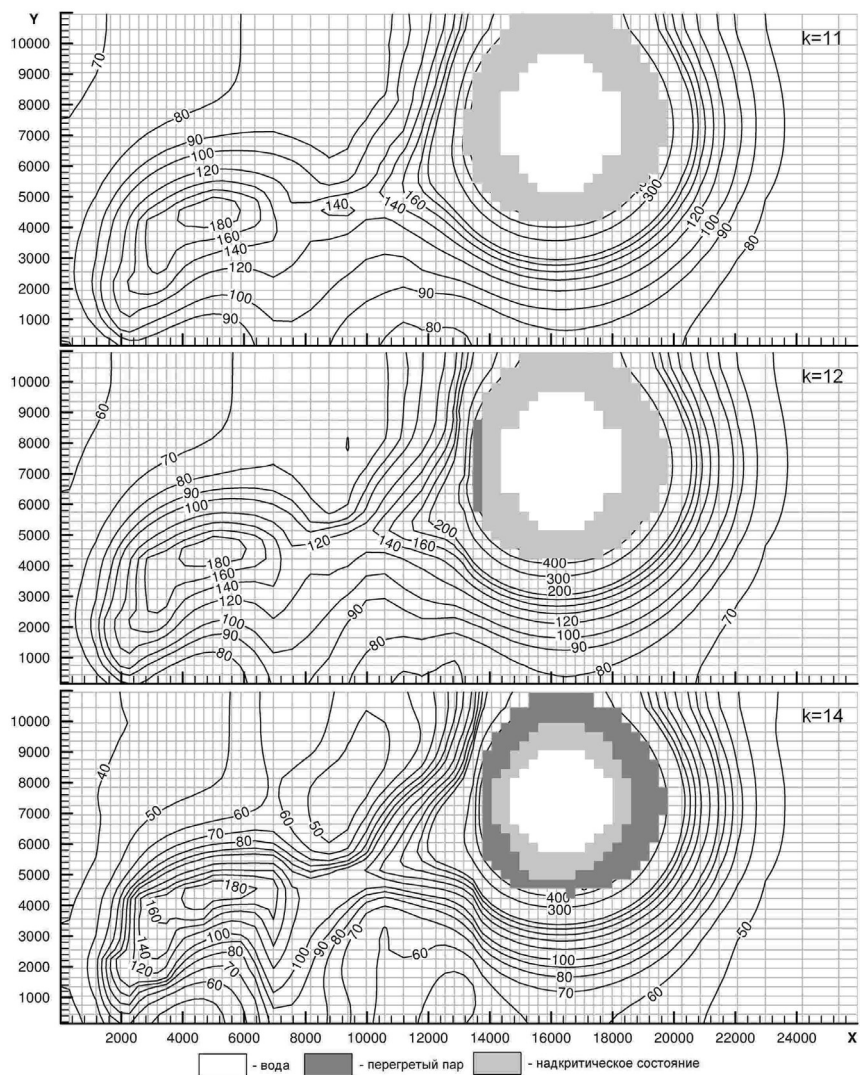


Рис. 7. Распределение температуры и фазового состояния на момент времени 60 тыс. лет в разрезах по оси z. В правом верхнем углу – номер разреза (рис. 1).

2. На расстоянии 10 – 12 км от центра магматического очага в южном секторе системы вероятно расположение области интенсивной конвекции теплоносителя.

3. Температура горных пород системы на расстоянии 10 – 12 км к югу-юго-востоку от центра магматического очага на глубине 1,0 – 2,0 км по результатам численных экспериментов составляет 160 – 200°C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А. и др. Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) // Вулканология и сейсмология. – 1988. – № 2. – С.43–55.
2. Козырев А.И., Фарберов А.И., Ванде-Кирков Ю.В. Физические свойства эффузивных и субвулканических пород Авачинского и Корякского вулканов // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 6. – С.54–72.
3. Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 4. – С.3–10.
4. Овчеренко В.В., Наумов Л.Т., Смирнова Н.Ф. Отчет о результатах поисковых работ, проведенных в 1968–1970 гг. в южной части Корякско-Авачинской вулcano-тектонической депрессии с целью оценки перспектив получения термальных вод. Корякско-Авачинская гидрогеологическая партия, пос. Термальный, Камчатская область. – 1970. – 162 с.
5. Пашкевич Р.И. и др. Отчет о научно-исследовательской работе: «Исследование геотермальных ресурсов Авачинской группы вулканов, полуостров Камчатка, Камчатский край». Фонды НИГТЦ ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2015, в 3-х тт., – 787 с.
6. Пашкевич Р.И., Горбач В.А., Павлов К.А., Шадрин А.В. Термометрическая съемка участка Авачинской геотермальной системы // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. – С. 24-34.
7. Пашкевич Р.И., Павлов К.А. Термогидродинамическое моделирование Авачинской магматогенной геотермальной системы // ГИАБ, Специальный выпуск «Камчатка». 2014. – С. 192–204.
8. Пашкевич Р.И., Песоцкий Д.Г., Балыков А.А., Мамаев Д.В. Магнитотеллурические исследования в южном секторе Авачинской геотермальной системы // ГИАБ, Специальный выпуск «Камчатка». 2014. – С. 47–53.
9. Пашкевич Р.И., Югин В.В., Агачев В.А. Результаты обработки тепловизионных данных космического снимка участка Авачинской геотермальной системы // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. – С. 35-39.
10. Федотов С.А. О входных температурах магм, образовании, размерах и эволюции магматических очагов вулканов // Вулканология и сейсмология. – 1980. – № 4. – С.3–29.
11. Федотов С.А., Балеста С.Т., Дроздин В.А., Масуренков Ю.П., Сугробов В.М. О возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана // Бюллетень вулканологических станций. – 1977. – № 53. – С.27–37.
12. Федотов С.А. Сугробов В.М., Уткин И.С., Уткина Л.И. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружаю-

ших его пород для тепло- и электроснабжения // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 1. – С.32–46.

13. Яновский Ф.А. О теплопроводности вулканогенно-осадочных пород Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 5. – С.77–84.

14. Hayba D.O., Ingebritsen S.E. The computer model Hydrotherm, a three-dimensional finite-difference model to simulate ground-water flow and heat transport in the temperature range of 0 to 1200°C // U.S. Geol. Surv. Water Res. Invest. Rep. 94-4045. – 1994. – P.85.

15. Kipp K.L., Jr., Hsieh P.A., Charlton S.R. Guide to revised ground-water flow and heat transport simulator: HYDROTHERM – Version 3: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A25. – 2008.

16. Tecplot user's manual, version 9.2, release 1. Amtec Engineering, Inc. Bellevue, Washington. – 2002.

17. Пашкевич Р.И., Шадрин А.В. Корреляция термометрических, тепловизионных и магнитотеллурических данных для участка Авачинской геотермальной системы // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. – С. 82-85.

18. Пашкевич Р.И., Мамаев Д.В. Корреляция данных термометрической съемки, обработки космического снимка и численного термодинамического моделирования Авачинской геотермальной системы // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. – С. 79–81. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Пашкевич Роман Игнатьевич – доктор технических наук, директор, pashkevich@kscnet.ru,

Мамаев Дмитрий Викторович – научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru,

Павлов Кирилл Алексеевич – научный сотрудник, 9pavkir9@gmail.com,

Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



UDC 536.246+550.367+519.876.5

THERMOHYDRODYNAMIC SIMULATION OF AVACHA GEOTHERMAL SYSTEM CONSIDERING THERMOMETRIC SURVEY DATA AND LANDSAT IMAGES

Pashkevich R.I., Doctor of Technical Sciences, Director, pashkevich@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,

Мамаев Д.В., Research Scientist, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,

Pavlov K.A., Research scientist, nigtc@gmail.com, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

The results of numerical modeling of thermohydrodynamic Avachinsky geothermal system are presented. The model is based on available geological and geophysical data. Established inferred temperature and location of the rocks prospective for industrial development are found.

Key words: Avacha geothermal system, convective heat transfer, thermohydrodynamic model, numerical simulation.

REFERENCES

1. Balesta S.T., Gontovaja L.I., Kargopol'cev A.A. i dr. *Seismicheskaja model' Avachinskogo vulkana (po dannym KMPV-GSZ)* (Seismic model of the Avachinsky volcano (according to kmpv-PES)) // Vulkanologija i sejsmologija. 1988. No 2. pp.43–55.
2. Kozyrev A.I., Farberov A.I., Vande-Kirkov Ju.V. *Fizicheskie svojstva effuzivnykh i subvulkanicheskikh porod Avachinskogo i Korjaksckogo vulkanov* (Physical properties of effusive and subvolcanic rocks of Avachinsky and Koryaksky volcanoes) // Vulkanologija i sejsmologija. 1989. No 6. pp.54–72.
3. Moroz Ju.F., Gontovaja L.I. *Glubinnoe stroenie rajona Avachinsko-Korjaksckoj gruppy vulkanov na Kamchatke* (Deep structure of the area of the Avachinsky-Koryaksky group of volcanoes in Kamchatka) // Vulkanologija i sejsmologija. 2003. No 4. pp.3–10.
4. Ovcherenko V.V., Naumov L.T., Smirnova N.F. *Otchet o rezul'tatakh poiskovykh rabot, provedennykh v 1968–1970 gg. v juzhnoj chasti Korjakscko-Avachinsckoj vulkanotektonicheskoi depressii s celju ocenki perspektiv poluchenija termal'nykh vod* (A report on the results of prospecting carried out in 1968-1970 in the southern part of the Koryaksky-Avachinsky volcano-tectonic depression to assess the prospects of obtaining thermal waters. Koryaksky-Avachinsky hydrogeological party). Korjakscko-Avachinsckaja gidrogeologicheskaja partija, pos. Termal'nyj, Kamchatsckaja oblast'. 1970. 162 p.
5. Pashkevich R.I. i dr. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote: «Issledovanie geotermal'nykh resursov Avachinsckoj gruppy vulkanov, poluostrov Kamchatka, Kamchatsckij kraj* (Report about scientifically-research work: "Investigation of geothermal resources of the Avachinsky group of volcanoes, Kamchatka Peninsula, Kamchatka Krai). Fondy NIGTC DVO RAN, Petropavlovsk-Kamchatsckij, 2015, v 3-kh tt., 787 p.
6. Pashkevich R.I., Gorbach V.A., Pavlov K.A., Shadrin A.V. *Termometricheskaja snemka uchastka Avachinsckoj geotermal'noj sistemy* (Thermometric survey of the area of the Avacha geothermal system) // GIAB No 11, «Kamchatka-2» (special issue No 63). 2015, pp. 24-34.
7. Pashkevich R.I., Pavlov K.A. *Termogidrodinamicheskoe modelirovanie Avachinsckoj magmatogennoj geotermal'noj sistemy* (Thermohydrodynamic modeling of Avachinsky magmatogene geothermal system) // GIAB, Special issue «Kamchatka». 2014. pp.192–204.
8. Pashkevich R.I., Pesockij D.G., Balykov A.A., Mamaev D.V. *Magnitotelluricheskie issledovanija v juzhnom sektore Avachinsckoj geotermal'noj sistemy* (Magnetotelluric studies in the southern sector of the Avachinsky geothermal system) // GIAB, Special issue «Kamchatka». 2014. pp.47–53.
9. Pashkevich R.I., Jugin V.V., Agachev V.A. *Rezul'taty obrabotki teplovizionnykh dannyx kosmicheskogo snimka uchastka Avachinsckoj geotermal'noj sistemy* (Results of processing thermal imaging data the satellite image of the area of the Avacha geothermal system) // GIAB No 11, «Kamchatka-2» (special issue No 63). 2015. pp. 35-39.
10. Fedotov S.A. *O vkhodnykh temperaturakh magm, obrazovanii, razmerakh i ehvoljucii magmaticheskikh ochagov vulkanov* (The input magma temperature, formation, dimensions and evolution of magma chambers of volcanoes) // Vulkanologija i sejsmologija. 1980. No 4. pp.3–29.

11. Fedotov S.A., Balesta S.T., Droznin V.A., Masurenkov Ju.P., Sugrobov V.M. *O vozmozhnosti ispol'zovanija tepla magmaticheskogo ochaga Avachinskogo vulkana* (About the possibility of using the heat of the magma chamber of the Avachinsky volcano) // *Bjulleten' vulkanologicheskikh stancij*. 1977. No 53. pp.27–37.
12. Fedotov S.A. Sugrobov V.M., Utkin I.S., Utkina L.I. *Vozmozhnosti ispol'zovanija tepla magmaticheskogo ochaga Avachinskogo vulkana i okruzhajushhikh ego porod dlja teplo- i ehlektrosnabzhenija* (Possibilities of using the heat of the magma chamber of the Avachinsky volcano and the surrounding rock for heat and power) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 2007. No 1. pp.32–46.
13. Janovskij F.A. *O teploprovodnosti vulkanogenno-osadochnykh porod Kamchatki* (On the thermal conductivity of volcanogenic-sedimentary rocks of Kamchatka) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1989. No 5. pp.77–84.
14. Hayba D.O., Ingebritsen S.E. The computer model Hydrotherm, a three-dimensional finite-difference model to simulate ground-water flow and heat transport in the temperature range of 0 to 1200°C // *U.S. Geol. Surv. Water Res. Invest. Rep.* 94–4045. 1994. P.85.
15. Kipp K.L., Jr., Hsieh P.A., Charlton S.R. Guide to revised ground-water flow and heat transport simulator: HYDROTHERM – Version 3: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A25. 2008.
16. Tecplot user's manual, version 9.2, release 1. Amtec Engineering, Inc. Bellevue, Washington. 2002.
17. Pashkevich R.I., Shadrin A.V. *Korreljacija termometricheskikh, teplovizionnykh i magnetotelluricheskikh dannyx dlja uchastka Avachinskoj geotermal'noj sistemy* (Correlation of temperature, thermal imaging and magnetotelluric data for the area of Avachinsky geothermal system) // *GIAB No 11, «Kamchatka-2»* (special issue No 63). 2015, pp. 82-85.
18. Pashkevich R.I., Mamaev D.V. *Korreljacija dannyx termometricheskoy s'emki, obrabotki kosmicheskogo snimka i chislennogo termodinamicheskogo modelirovanija Avachinskoj geotermal'noj sistemy* (Correlation of thermometric shooting, processing of satellite imagery and numerical thermodynamic modeling of the geothermal system Avachinsky) // *GIAB No 11, «Kamchatka-2»* (special issue No 63). 2015. pp. 79–81.