

УДК 550.341.5

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ ПОРОД НА КОЛЛЕКЦИИ ПЕТРОТИПОВ-КОЛЛЕКТОРОВ ТРИАСОВОГО ВУЛКАНОГЕННОГО РЕЗЕРВУАРА**Кирюхин А.В., Поляков А.Ю., Мушинский А.В.***Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,**Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail avk2@kscnet.ru***Аннотация**

Для определения тепловых свойств вулканогенного резервуара триасового возраста использовано инверсионное четырехпараметрическое iTOUGH2-EOS3 моделирование лабораторных экспериментов по прослеживанию температурной волны в цилиндрических образцах (38 образцов): средние значения теплопроводности и удельной теплоемкости сухих горных пород составляют 1.44 Вт/м°C и 850 кДж/кг°C, соответственно. Для проведения экспериментов разработана лабораторная установка.

Введение

Необходимость оценки тепловых характеристик нефтенасыщенного триасового вулканогенного резервуара в Западной Сибири вызвана следующими причинами. Использование термогидродинамического моделирования для анализа наблюдаемого в пределах вулканогенного резервуара аномального распределения температур и давлений привело к выводу о том, что возможным сценарием формирования нефтяной залежи в пределах вулканогенно-осадочного комплекса пермо-триасового возраста является поступление нефти снизу по каналам жерловой фации вулканических аппаратов триасового возраста. При этом значения теплопроводности принимались по литературным данным. Приложения моделирования к анализу условий неизотермической эксплуатации резервуара трещинно-блокового типа с вытеснением исходной нефтяной фазы закачкой воды – еще в большей степени зависят от тепловых характеристик резервуара, т.к в этом случае необходимо рассматривать тепловое взаимодействие между трещинами и блоками с учетом уже двух тепловых характеристик: теплопроводности и удельной теплоемкости. В качестве исходных данных для выполнения измерений коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости триасового вулканогенного резервуара, изучались 38 образцов, отобранных из скважины вместе с каталогом, содержащим краткое петрографическое описание, результаты определений минеральной и объемной плотности, пористости, проницаемости по каждому из предоставленных образцов. Образцы, предоставленные для измерений, представляют собой цилиндры со средним диаметром 50 мм и средней высотой 50 мм.

Определение тепловых свойств методом инверсионного моделирования зондового прослеживания температурного фронта в образце под воздействием теплового источника постоянной мощности.

Организация лабораторного эксперимента.

Для определения теплопроводности образцов горных пород использована оригинальная установка [1,3], включающая маломощный (25 Вт) нагреватель, теплоизолированную капсулу для удерживания цилиндрического образца с открытым в сторону нагревателя

нижним торцом и размещения зонда термомонолога в зондировочном отверстии глубиной 10 мм и диаметром 2.4 мм на противоположном торце образца (рис. 1). Для обеспечения постоянной начальной температуры в ходе эксперимента, установка с образцами и регистрирующим логгером выстаивалась в течение 18 ч до начала эксперимента в специальном лабораторном помещении, размещенном в подвале, в котором обеспечивались минимальные суточные колебания температуры (не более 0.5°C). За 5 мин до включения нагревателя регистрировалась начальная температура образца, затем на 5 мин включался тепловой источник, и с временным интервалом 10 с, регистрировалось прохождение температурной волны через образец. Результаты регистрации изменения температуры преобразовывались в цифровой вид и использовались в качестве калибровочных данных для решения обратной задачи оценки тепловых параметров образца.

Численная модель для описания теплопереноса в сухом цилиндрическом образце (TOUGH2-EOS3)

Численная модель базируется на вычислительной программе TOUGH2, разработанной для моделирования многомерных, неизотермических потоков многофазных, многокомпонентных флюидов в пористой и трещиноватой среде (полная документация по программе TOUGH2 содержится на сайте <http://www-esd.lbl.gov/TOUGH2>). Реализованные в вычислительном коде TOUGH2 управляющие уравнения многокомпонентного многофазного теплопереноса (уравнения сохранения массы и энергии) в трещинно-пористой среде редуцируются применительно к эксперименту по нагреванию образца следующим образом.

1. В поровом пространстве образца рассматриваются две фазы: жидкая (вода) и газообразная (воздух). Такая постановка задачи отвечает уравнению состояния, реализованному в модуле EOS3 вычислительного кода TOUGH2. Поскольку образцы высушивались перед проведением измерений, то насыщение жидкой фазы задавалось пренебрежимо малым (0.001).

2. Цилиндрический образец рассматривается теплоизолированным с боковой поверхности и на верхнем торце, на нижнем торце задается тепловой поток, равный мощности теплового источника.

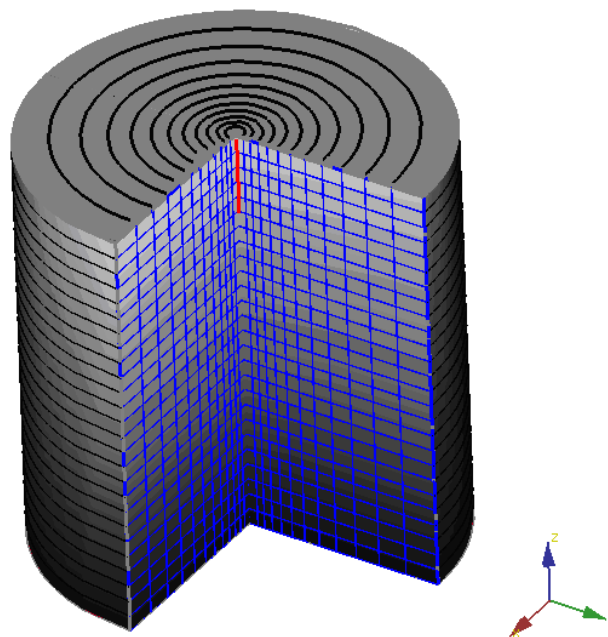


Рис. 1. Геометрия вычислительной сетки, используемой для моделирования прохождения температурного фронта в цилиндрическом образце. На верхнем торце показано местоположение зонда термомонолога, используемого для регистрации температурного фронта, перемещающегося от теплового источника, размещенного в нижнем торце образца.

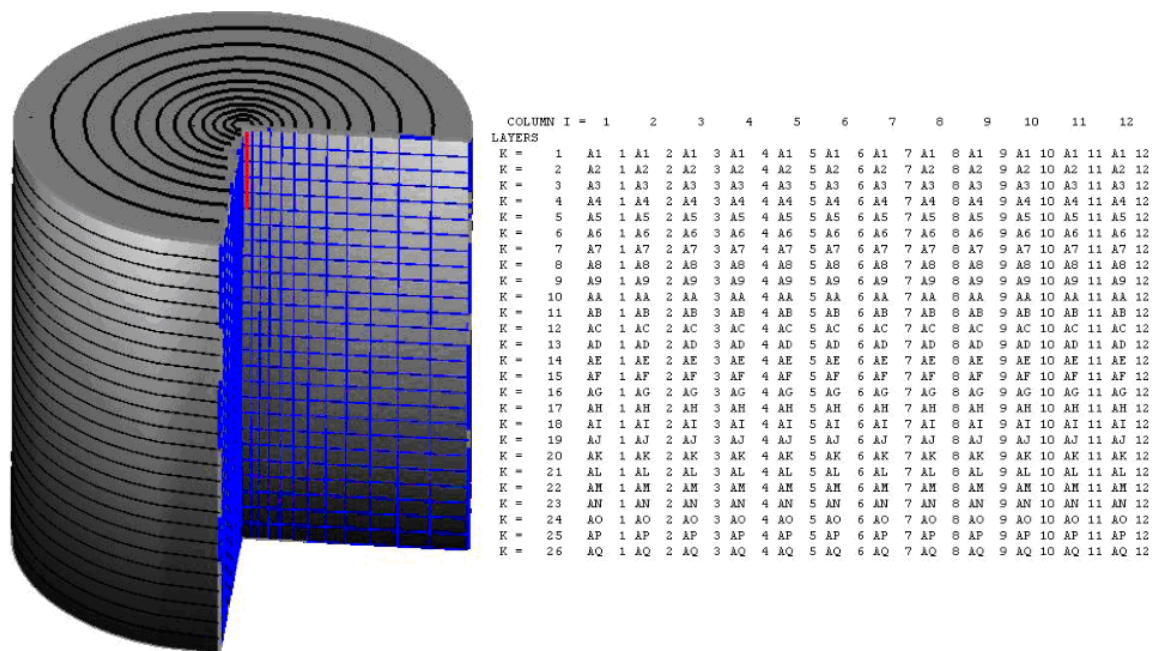


Рис. 2. Нумерация элементов радиально-цилиндрической вычислительной сетки, используемой для моделирования прохождения температурного фронта в цилиндрическом образце. Вычислительная сетка состоит из 26-ти горизонтальных слоев (LAYERS) и 12-ти радиальных зон (COLUMNS).

Генерация вычислительной сетки и параметризация лабораторного эксперимента

Радиально-цилиндрическая вычислительная сетка, используемая для представления нагреваемого образца и обработки эксперимента показана на рис. 1, 2. Сетка включает 26 слоев и 12 радиальных зон. Каждый слой имеет мощность 2 мм, радиальные зоны задаются последовательностью логарифмически увеличивающихся радиусов (с коэффициентом 1.165), первый радиус соответствует радиусу зонда 1.2 мм, последний радиус – радиусу цилиндрического образца 25 мм. Нумерация элементов вычислительной сетки осуществлялась с использованием кодового имени элемента модели в формате AI_K, где I – номер слоя (слои нумеровались сверху вниз), K – номер радиальной зоны (от центра к периферии). Зонд термологгера задавался в элементах модели AI_1, где I = 1,2,3,4,5 определялось глубиной зондировочного отверстия 10 мм.

В качестве известных исходных петрофизических параметров задавались минеральная плотность, пористость и проницаемость. Поскольку поровое пространство образцов более чем на 99% было заполнено воздухом (эксперименты проводились на сухих образцах), в качестве уравнения состояния использовался модуль EOS-3, включающий две фазы: газовую (воздух с парами воды) и водную (вода с растворенным воздухом). В данном уравнении состояния в качестве основных переменных используются три: давление P , насыщение газовой фазы (воздух) S_g , температура T . Начальные значения: $P = 10^5$ Па, $S_g = 0.999$ (образцы сухие). Зависимость теплопроводности λ от насыщения порового пространства водой задавалась формулой

$$\lambda = \lambda_r + (\lambda_w - \lambda_r) S_w$$

где λ_w – теплопроводность насыщенных водой горных пород, λ_r – теплопроводность сухих горных пород, S_w – насыщение воды.

Источник тепла задан в элементе «В», сообщаемом с элементами модели нижнего слоя АА_К. В элементе «В» задавалась тепловая мощность W , определяемая, как один из оцениваемых параметров.

Методика инверсионного iTOUGH2-EOS3 моделирования

Для оценивания параметров модели (λ_r – теплопроводности сухих горных пород и C_R – удельной теплоемкости скелета горных пород) использовалась программа iTOUGH2 [2, 4].

В данном случае, в качестве калибровочных данных использовались температуры, зафиксированные термолотгером зондового типа в углублении на верхнем торце испытываемого образца.

В качестве оцениваемых модельных параметров рассматривались теплопроводность λ_r (сухих пород), удельная теплоемкость C_r , начальная температура T_0 и поглощаемая образцом мощность теплового источника W . Включение начальной температуры T_0 и мощности теплового источника W в число оцениваемых параметров вызвано высокой чувствительностью модели к указанным параметрам.

В результате инверсионного моделирования, представляющего собой алгоритмический процесс решения обратной многопараметрической задачи, осуществляются оценки искомых параметров, невязки модельного решения с фактическими данными измерений, чувствительность модели по отношению к оцениваемым параметрам, степень взаимной корреляции оцениваемых параметров, погрешности оценивания.

На рис. 3, 4 и 5 приводится пример обработки лабораторного эксперимента по образцу №18.

Для наглядности, приводим также график сравнения результатов моделирования с фактическими данными лабораторных измерений по образцу №18 (рис. 6).

Результаты определения теплопроводности и удельной теплоемкости пород триасового вулканогенного резервуара

Результаты определения теплопроводности и удельной теплоемкости горных пород, вскрытых в триасовом вулканогенном резервуаре иллюстрируются рис. 7 и 8.

Среднее значение теплопроводности 1.44 Вт/м°C. Среднее значение удельной теплоемкости 850 кДж/кг°C. При этом туфы характеризуются средними значениями теплопроводности 1.38 Вт/м°C и удельной теплоемкости 853 кДж/кг°C (7 образцов), эффузивные породы – 1.41 Вт/м°C и 854 кДж/кг°C (15 образцов), кластолавы и лавобрекчии – 1.50 Вт/м°C и 844 кДж/кг°C (16 образцов). Интенсивно нефтенасыщенные лавы и брекчии в среднем характеризуются пониженными значениями теплопроводности 1.34 Вт/м°C (10 образцов).

Сопоставление тепловых и фильтрационно-емкостных свойств показывает, что при уменьшении пористости и логарифма проницаемости наблюдается некоторый тренд увеличения коэффициента теплопроводности при коэффициентах корреляции 0.44 и 0.11, в то же время удельная теплоемкость практически не зависит от пористости и проницаемости.

Теплопроводность и удельная теплоемкость туфогенных отложений гор Якка (США) по данным Yucca Mountain Project

В Министерстве энергетики США на протяжении тридцати лет осуществляется изучение многослойной пачки туфов неогенового возраста (12.5 млн. лет), разбитой системой трещин разломов в горах Якка (Невада) [5] – в связи с предполагаемым использованием для изоляции и длительного (тысячи лет) хранения высокоактивных радиоактивных отходов. Особенностью геологических условий залегания туфов является переслаивание мощных пачек «спекшихся» и «неспекшихся» туфов, слабонаклонное залегание (углы падения 6–7.5 град.) и развитие системы разломов субмеридионального направления. Спекшиеся туфы характеризуются высокой пористостью порядка 10%, но очень низкой матричной проницаемостью (порядка микроДарси). Они включают около 10 трещин на м³, при этом средняя проницаемость системы трещин составляет 10 Дарси. Неспекшиеся туфы имеют пористость порядка 30%, разбиты более редкой системой трещин и имеют матричную проницаемость порядка 100 мД.

По результатам проведенных исследований [6], петрофизические и тепловые свойства четырех основных литологостратиграфических подразделений туфов (TCw – Tiwa Canion welded – спекшиеся туфы, PTn – Paint Brush nonwelded – неспекшиеся туфы, TSw – Toropah Spring welded – спекшиеся туфы, CHn – Calico Hills nonwelded – неспекшиеся туфы) оцениваются следующим образом.

Значения $\lambda = 1.12\text{--}1.18$ Вт/м °С для спекшихся туфов ниже средних значений для туфов вулканогенного триасового резервуара, которые характеризуются средними значениями теплопроводности 1.38 Вт/м °С, что достаточно логично, учитывая более древний возраст последних и более высокую степень метаморфических преобразований. Диапазон средних значений удельной теплоемкости по неспекшимся туфам Якка Маунтэйн 851–901 Дж/кг °С включает оценку значения для удельной теплоемкости для туфов триасового вулканогенного резервуара – 853 Дж/кг °С.

Выводы

В результате определения теплопроводности и удельной теплоемкости горных пород, слагающих нефтенасыщенный триасовый вулканогенный резервуар установлено, что среднее значение коэффициента теплопроводности сухих горных пород составляет 1.44 Вт/м °С, среднее значение удельной теплоемкости 850 кДж/кг °С (38 образцов).

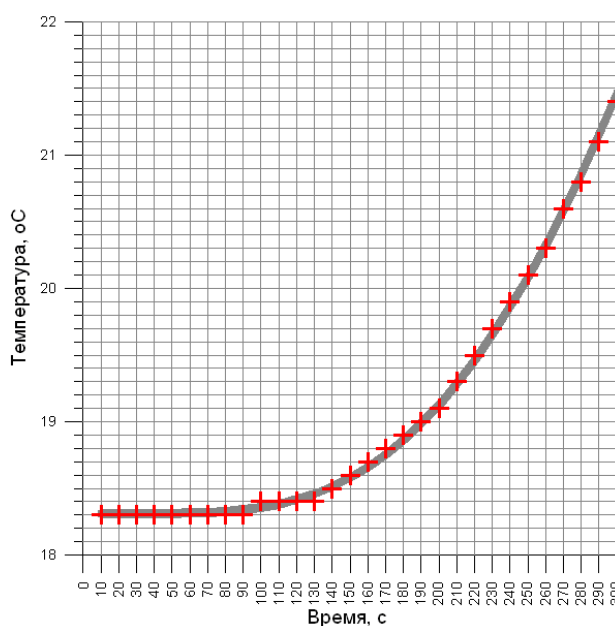


Рис. 6. График сравнения результатов iTOUGH2-EOS3-моделирования с фактическими данными лабораторных измерений по образцу №18. Данные измерений показаны красными крестиками, результаты моделирования – непрерывной линией.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ ПОРОД НА КОЛЛЕКЦИИ ПЕТРОТИПОВ-КОЛЛЕКТОРОВ ТРИАСОВОГО ВУЛКАНОГЕННОГО РЕЗЕРВУАРА

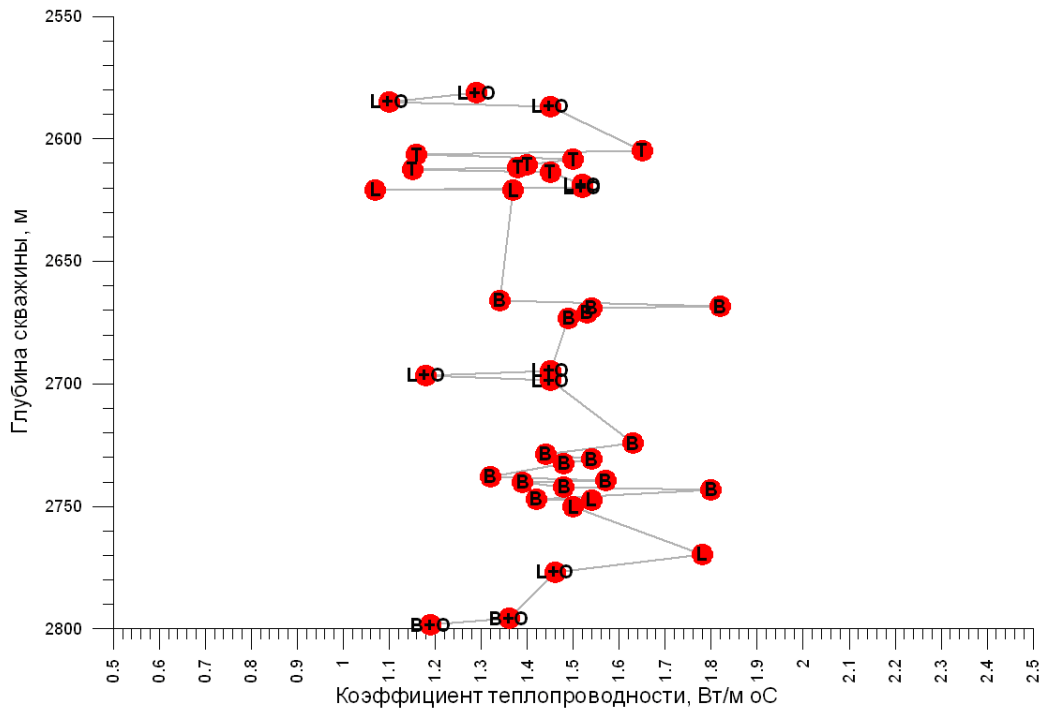


Рис. 7. Распределение коэффициента теплопроводности по глубине. L – лавы, T – туфы, B – брекчии, L+O – лавы нефтенасыщенные, B+O – брекчии нефтенасыщенные.

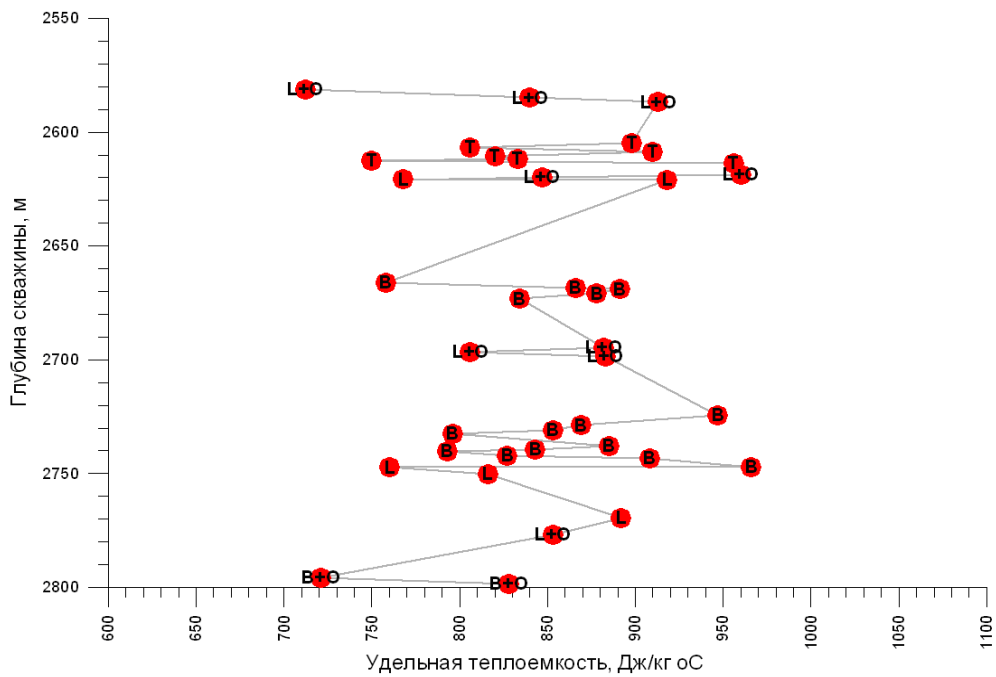


Рис. 8. Распределение удельной теплоемкости по глубине. L – лавы, T – туфы, B – брекчии, L+O – лавы нефтенасыщенные, B+O – брекчии нефтенасыщенные.

При этом туфы характеризуются средними значениями теплопроводности 1.38 Вт/м °С и удельной теплоемкости 853 кДж/кг °С (7 образцов), эффузивные породы – 1.41 Вт/м °С и удельной теплоемкостью 854 кДж/кг °С (15 образцов), кластолавы и лавобрекчии – 1.50 Вт/м °С и удельной теплоемкостью 844 кДж/кг °С (16 образцов). Зоны интенсивно нефтенасыщенных лав и брекчий в среднем характеризуются пониженными значениями теплопроводности 1.34 Вт/м °С и удельной теплоемкости 840 кДж/кг °С (10 образцов). Увеличение пористости сопровождается снижением коэффициента теплопроводности сухих горных пород.

Полученные для триасового вулканогенного резервуара значения теплопроводности и удельной теплоемкости в целом согласуются с закономерностями изменений тепловых свойств неогеновой туфовой толщи Якка Маунтэйн (Невада, США).

Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 09–05–00605–а.

Список литературы.

1. *Кирюхин А.В., Поляков А.Ю., Мушинский А.В., Топчиева О.М.* \ \ Разработка методов определения теплопроводности и теплоемкости скальных пород геотермальных месторождений \ \ Материалы конференции ИВиС ДВО РАН, посвященной «Дню Вулканолога 30–31 марта 2009 г.», Петропавловск-Камчатский 2010, с.149–156
2. *Finsterle S.* iTOUGH2 User's Guide \ \ LBNL-40040, 1999, 130 p.
3. *Popov Yu.A., Pribnow D.F.C., Sass J.H., et al* Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning \ \ Geothermics, 28, 1999, p. 253–276
4. *Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G.,* 1999. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Lawrence Berkeley National Laboratory report LBNL-43134, Berkeley, CA, USA, 198 pp.
5. *Pruess K.* Two-Phase Unsaturated Flow at Yucca Mountain, Nevada: A Report on Current Understanding \ \ Flow and Transport Through Unsaturated Fractured Rock, 2–nd Edition, Geophysical Monograph 42, p. 113–133.
6. *Sass J.H. et al* Temperature, Thermal Conductivity and Heat Flow near Yucca Mountain: Some Tectonic and Hydrologic Implications. Open File Report 87–649. Denver, Colorado US GS. TIC: 203195.