DOI: 10.18454/PMI.2017.2.163

УДК 551.49+550.21

ИНВЕРСИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ИСТОРИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ 1986-2006 ГОДОВ

А.В.КИРЮХИН[1], О.О.УСАЧЕВА[2]
[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Численная 3D-модель Мутновского геотермального месторождения (Дачные источники), состоящая из 517 элементов и частично учитывающая двойную пористость, была разработана в 1992-1993 годах с помощью программы TOUGH2. Калибровка данной модели была выполнена по данным опытных выпусков из скважин и начального распределения температуры и давления в резервуаре. Эта модель использовалась для технико-экономического обоснования проекта строительства Мутновской ГеоЭС (2002 г.). Модель была воспроизведена при помощи программы PetraSim v.5.2, и для ее калибровки были использованы дополнительные данные по истории эксплуатации до 2006 г. и инверсионное iTOUGH2-EOS1-моделирование. Сравнение оценок параметров резервуара, полученных с использованием инверсионного моделирования, с предшествующими оценками параметров резервуара (даны в круглых скобках) показало следующее: расход восходящего потока теплоносителя в естественных условиях 80,5 (54,1) кг/с, энтальпия теплового потока 1430 (1390) кДж/кг, проницаемость резервуара $27 \cdot 10^{-15}$-$616 \cdot 10^{-15}$ ($3 \cdot 10^{-15}$-$90 \cdot 10^{-15}$) м^2. Инверсионное моделирование использовалось также для оценки расходов реинжекции, притока в резервуар метеорных вод в центральной части геотермального поля и сжимаемости резервуара.

Ключевые слова: 3D-моделирование, iTOUGH2, Мутновское, геотермальный, Камчатка

***Как цитировать эту статью*:** Кирюхин А.В. Инверсионное моделирование естественного состояния и истории эксплуатации Мутновского геотермального месторождения 1986-2006 годов / А.В.Кирюхин, О.О.Усачева // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 163-169. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.163

Введение. Рассматриваемый район был всесторонне изучен и описан многими исследователями [1, 3, 5, 6, 12]. Также были предложены различные концептуальные модели Мутновского месторождения [1, 10]. Эксплуатация Мутновского геотермального месторождения (рис.1) с установленной мощностью ГеоЭС 62 МВт чрезвычайно важна для развития энергетики Камчатки с использованием возобновляемых теплоэнергетических ресурсов. Кроме того, полученный опыт может быть использован при разработке других крупных геотермальных месторождений Курило-Камчатского региона, понимания связи вулканической, гидротермальной деятельности и сейсмической активности.

С начала крупномасштабной эксплуатации, в течение первых лет (2002-2006 годы) произошло существенное снижение паросодержания в резервуаре: с 0,46 до 0,27 (рис.2). Некоторые продуктивные скважины были выведены из эксплуатации (049N, 055, 5E, 4E, 053N, 017N) в связи с падением устьевого давления. Есть также признаки притока локальных метеорных вод в резервуар.

Эксплуатация месторождения, осуществляемая с 2000 г. с отбором теплоносителя до 500 кг/с (600 МВт), сопоставима с энергетической мощностью близрасположенных активных вулканов: Мутновского (8 км, 190 МВт) и Горелого (10,5 км, 100 МВт). Разработка месторождения сопровождается гидротермальной взрывной активностью Мутновского вулкана после 40 лет затишья (гидротермальные взрывы в кратере 17 марта 2000 г., в апреле 2007 г. и мае 2012 г.) [2]; началом фумарольной активности вулкана Горелый в 2010 г.; исчезновением озера в кратере Мутновского вулкана (2004 г.) и в кратере вулкана Горелого (2012 г.). Процесс эксплуатации также сопровождается усилением сейсмической активности. По данным Камчатского филиала геофизической службы РАН, с февраля 2009 по май 2012 г. на глубине 2-6 км было зарегистрировано 11 землетрясений с магнитудой 1,3-2,0.

На эксплуатируемом участке месторождения отмечены гидротермальные взрывы и возникновение новых кипящих котлов, деградация хлоридных горячих источников (уменьшение расхода, снижение минерализации), также зафиксировано снижение давления на 2 бара в наблюдательной скважине, расположенной вблизи Вилючинских источников, исчезновение Воиновских и Верхне-Жировских источников, существенное снижение содержания хлора в Нижне-Жировском источнике.

Из изложенного следует, что процесс эксплуатации месторождения и связанные с ним явления требуют всестороннего гидрогеологического анализа, в том числе использования моде-

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.163

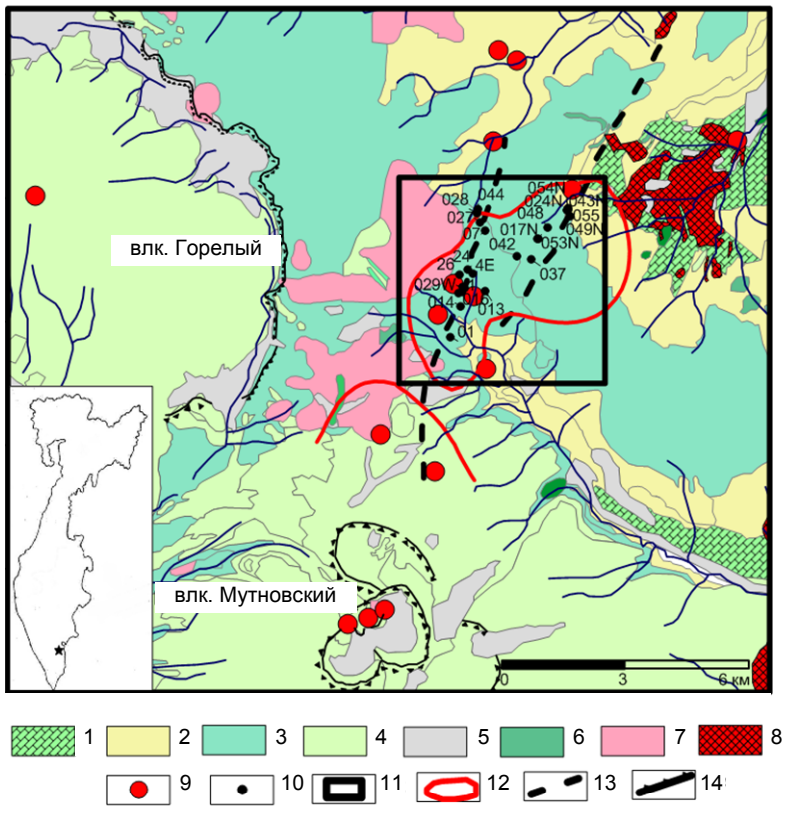


Рис.1. Схематическая геологическая карта Мутновского геотермального месторождения

1 – третичные вулканогенно-осадочные породы; 2 – туфы и лавы базальтов, андезибазальтов, андезит-дацитов Асачинской свиты и Алнейской серии; 3 – четвертичные базальты и их туфы; 4 – вулканиты вулканов Мутновский и Горелый; 5 – современные водно-ледниковые отложения и ледники вулкана Мутновский; 6 – четвертичные дайки и штоки базальтов; 7 – экструзии риолитов и дацитов; 8 – третичные диоритовые интрузии; 9 – фумарольные поля и термальные источники; 10 – добычные и инжекционные скважины; 11 – границы модели; 12 – изолинии температуры 230 °С на абс.отметке –250 м; 13 – проекции продуктивных разломов на абс.отметке –250 м; 14 – кальдеры

лирования с целью совершенствования методики геологоразведочных работ на теплоэнергетические воды, включая методы оценки их ресурсов и эксплуатационных запасов.

Сборка модели Мутновского геотермального месторождения. Исходная термогидродинамическая модель Мутновского геотермального месторождения собрана в 1991 г. в Лоуренсовской беркелевской лаборатории (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA) с использованием вычислительной программы TOUGH2 [13] и суперкомпьютера CRAY-X-MP. Калибровка модели была выполнена по данным истории эксплуатации 1984-1987 годов и начальному распределению температуры и давления (по данным П.П.Блукке, Н.П.Асауловой и др. Отчет … с подсчетом запасов теплоносителя для обоснования проекта строительства первой очереди Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт, 1987). Приложения этой модели для прогноза различных вариантов эксплуатации месторождения опубликованы в работах [4, 11].

С появлением эффективных пре- и постпроцессоров для TOUGH2-моделирования, а также возможности инверсионного iTOUGH2-моделирования [7-9] скорость сборки моделей, их тестирование и применение существенно возросли. Это позволило воспроизвести модель 1996 г. с использованием препроцессора PetraSim v.5.2. Эта модель может быть применена для оценки запасов Мутновского месторождения, так как содержит минимальное необходимое количество элементов для описания существующего резервуара. Такая модель соответствует «модели гидравлического типа», которая применяется в России для оценки эксплуатационных запасов месторождений третьей группы сложности.

В дополнение к предшествующей модели определено 20 скважин, из них 16 добычных и 4 инжекционных (рис.3). Продуктивные скважины 016 и 26 – пародоминирующие, заданы во втором слое модели, представленном риолитовыми туфами (домен Tuff2 в модели). Продуктивные скважины 01, 014, 029W, 24, 055, 048 и инжекционные скважины 027 (+028+044), 07 заданы в среднем слое модели, включающем вулканогенные и осадочные породы (область Sand1 в модели). Продуктивные скважины 1, 4E, 013, 042, 037, 053N, 017N, 049N и инжекционные скважины 043N, 054N заданы в четвертом от поверхности слое модели (интрузивная контактная зоны, область Cont1 в модели). Добычные скважины задаются на модели с расходом, изменяющимся во времени; на инжекционных скважинах дополнительно устанавливается энтальпия закачиваемой воды в соответствии с данными К.И.Мальцевой и др. (отчет по пересчету эксплуатационных запасов теплоносителя по Мутновскому месторождению парогидротерм по состоянию на 31.12.2006 г.).

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.163

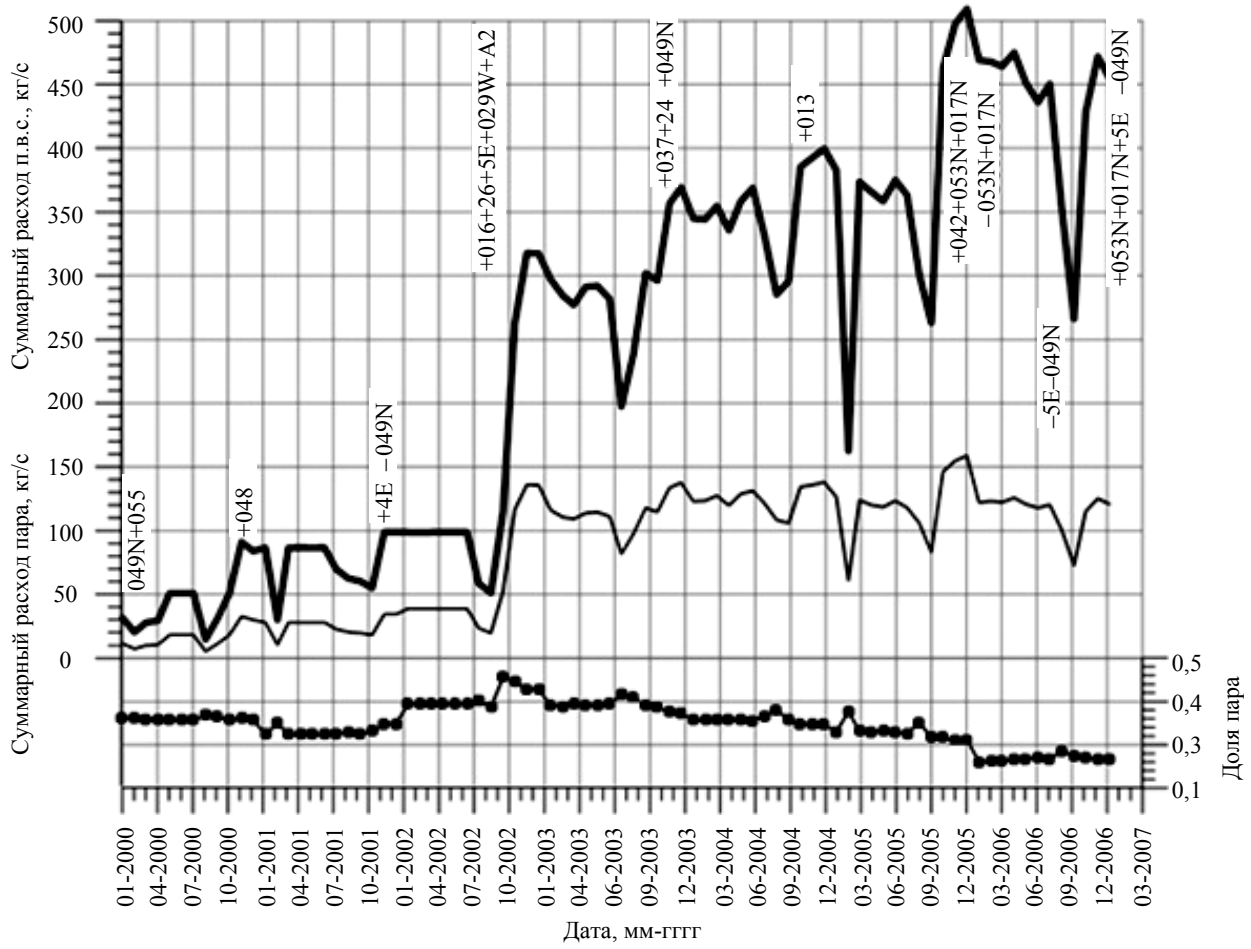


Рис.2. Общая выработка пароводяной смеси (п.в.с.) на Мутновском геотермальном месторождении – верхний график; выработка пара – средний график и паросодержание (нижний график).
Временна́я ось показана в формате месяц-год (мм-гггг)

В отдельных элементах модели, содержащих эксплуатационные скважины, определена двойная пористость. Включение в данную модель двойной пористости оказалось необходимым для воспроизведения на модели повышенных значений энтальпии в ряде эксплуатационных скважин. Скважины 016, 26, 01, 1, 24 и другие показывают энтальпию, превышающую энтальпию исходной жидкой воды, что свидетельствует о локальном подземном кипении в резервуаре. Задание двойной пористости на модели осуществлялось уменьшением объема исходного проницаемого элемента и присоединением к нему слабопроницаемого «матричного» элемента с суммарным объемом равным исходному.

Инверсионное iTOUGH2-EOS1-моделирование естественного состояния и истории эксплуатации. Инверсионное моделирование было организовано следующим образом: на первом этапе осуществлялся прогон модели до момента установившегося состояния; на втором этапе моделировалась история эксплуатации в 1987-2006 годах с полученными на первом этапе начальными данными.

Исходные данные для моделирования. Для калибровки модели по начальному состоянию использованы восемь измеренных значений температуры в скважинах, подтвержденных геохимическими данными (Na-K-геотермометры). Для проверки калибровки по истории эксплуатации взяты значения давления в наблюдательных скважинах 30 и 012 за 1995-2006 годы (общее количество измерений – 51), приведенные к глубинам –250 и –750 м соответственно. Для калибровки использованы также данные по среднемесячным значениям энтальпии 14 продуктивных скважин: 016, 26, 01, 1, 24, 048, 042, 029W, 037, 013, 055, 049N, 4E, 017N, – 592 значения за 1984-1987 и 2000-2006 годы. Дополнительный контроль расхода и энтальпии на индивидуальных скважинах (016, 26, 01, 1, 24, 042, 029W, 037, 013, 4E, 017N) осуществлялся на Мутновской геотермальной станции по разности расходов до и после отключения одной из скважин.

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.163

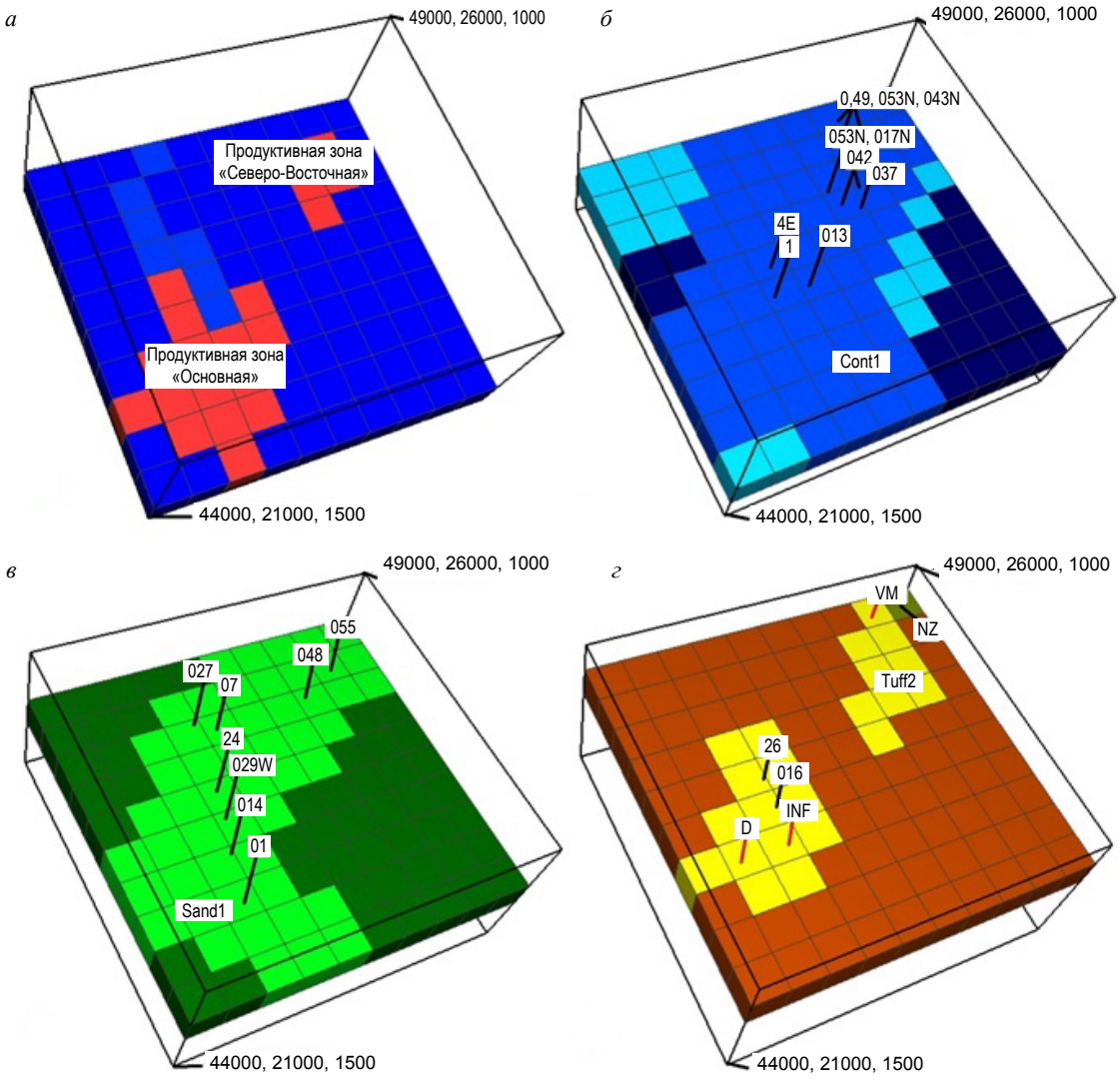


Рис.3. Трехмерная численная модель Мутновского геотермального месторождения: *а* – нижний слой модели (–1250 м абс.), включающий зоны притока глубинного теплоносителя «Основную» и «Северо-Восточную»; *б* – второй снизу слой (–750 м абс.) модели, содержащий проницаемый домен модели Cont1, который ассоциируется с интрузивной контактной зоной; *в* – третий снизу слой модели (–250 м абс.), включающий проницаемый домен Sand1, который ассоциируется с вулканогенно-осадочными породами; *г* – четвертый снизу слой модели (+250 м абс.), содержащий домен Tuff2, который ассоциируется на модели с риолитовыми туфами. Термопроявления, заданные на модели: D – Дачные паровые струи, VM – Верхне-Мутновские паровые струи, NZ – группа горячих источников (+250 м абс.). Продуктивные скважины указаны номерами

Оцениваемые параметры. В число оцениваемых параметров входили: расходы восходящих потоков (две зоны восходящих потоков, в пределах которых на модели задаются массовые источники, «Основной» и «Северо-Восточный»); расходы реинжекции – расходы четырех групп инжекционных скважин (027 (+028+044), 07, 043N, 054N (+024N)). Трещинная проницаемость определена в следующих слоях (сверху вниз): риолитовые туфы (область Tuff2), песчаники (область Sand1), интрузивная контактная зона (область Cont1) и диоритовая интрузия (MagmF); естественная разгрузка (три основные области разгрузки: Дачные – D (пар), Верхне-Мутновские – VM (пар) и разгрузка горячей воды, представленная несколькими группами горячих источников и заданная на модели как NZ); расход инфильтрации (питание резервуара нисходящим потоком метеорных вод происходит в области оз. Утиного и через некачественную обсадку старых скважин, пробуренных в 1980-х годах, определяется в одном из элементов на поверхности модели со значением энтальпии 42 кДж/кг; параметры двойной пористости (на модели определена ортогональная 3D-система трещин с долей трещинного пространства FF и расстоянием между трещинами FS); сжимаемость горных пород.

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.163

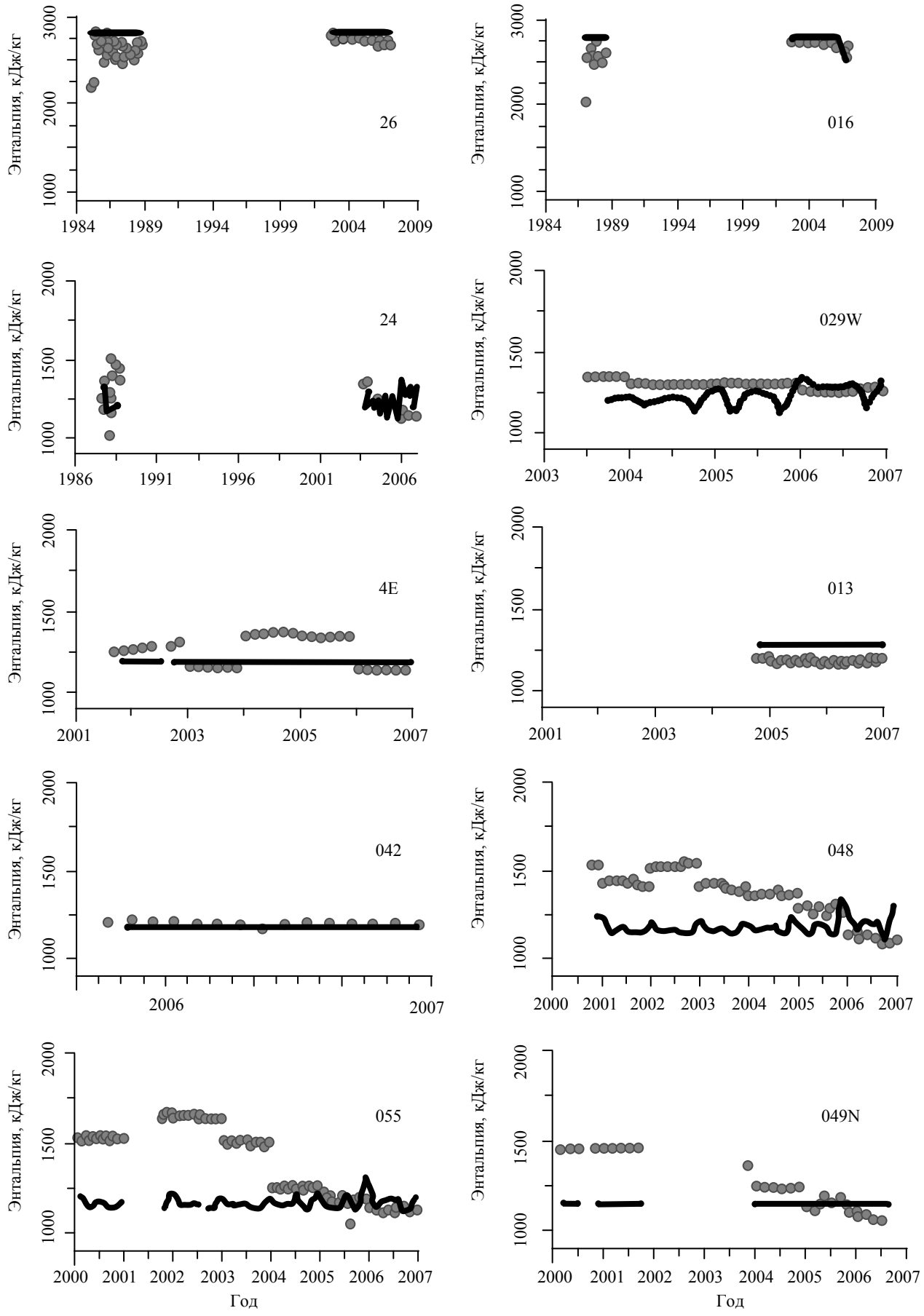


Рис.4. Сравнение модельных и фактических значений энтальпии: серые кружки – наблюдаемые данные, черная линия – результаты моделирования (сценарий 12-NS-EX-6)

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.163

Результаты оценки параметров. Моделирование пяти различных сценариев iTOUGH2-EOS1 (12-NS+EX-11, 7, 8, 11A, 12) приводят к следующим результатам. В сценарии 11A расход реинжекции оценивается в 42-85 % от фактических данных (62 % суммарного расхода). Объектные функции значительно уменьшаются, если на модели расходы реинжекции заданы равными нулю (сценарии 7, 8, 11A, 12). Минимальная достигнутая объективная функция соответствует сценарию 12. Однако и в данном сценарии моделирования наблюдаются существенные величины стандартных отклонений STD температур (6,2 °C), давлений (1,9 бар) и энтальпии (179 кДж/кг) от фактических данных. Модельные отклонения превышают соответствующие ошибки измерений. Кроме того, наблюдается систематическое занижение энтальпии (71 кДж/кг) и температуры (14,9 °C) и систематическое завышение давлений (–0,9 бар).

Эта ситуация была частично улучшена при помощи регулирования разгрузки в модельном элементе D: объектная функция снизилась и отклонения температуры уменьшились до 7,4 °C. В результате были получены следующие оценки параметров резервуара улучшенного сценария (12NS-EX-12A): расход восходящего потока «Основной» – 60,2 кг/с, расход восходящего потока «Северо-Восточный» – 20,3 кг/с, проницаемость туфов – $27\cdot10^{-15}$ м^2, проницаемость песчаников – $85\cdot10^{-15}$ м^2, проницаемость контактной зоны – $616\cdot10^{-15}$ м^2, интервалы между трещинами – 4,3 м, трещинная пористость – 0,42, расход инфильтрации – 103 кг/с, сжимаемость песчаников и пород контактной зоны – 1,3E-7 Па$^{-1}$.

Дополнительная калибровка модели по данным измерений начальных температур. Данные измерений температуры в скважинах получены на стадии разведки Мутновского геотермального месторождения во время бурения скважин: 72 температурные записи на забое скважин; 29 из 72 измерений, полученных в точках, расстояние которых до центра элементов модели составило менее 250 м, выбраны как дополнительные точки калибровки модели естественного состояния.

Прямые iTOUGH2-прогоны с параметрами (12NS-EX-12B) показывают систематическое занижение значений температуры (7,5 °C), что вызвано заниженными значениями энтальпий восходящих потоков, полученных по Na-K-геотермометрам (308 °C).

Дополнительное инверсионное моделирование с использованием энтальпии восходящих потоков в качестве оцениваемых параметров с верхним пределом 1450 кДж/кг (318 °C) (12-NS-EX-6, прогон с шестью заданными параметрами, остальные параметры были взяты из сценария 12) привело к следующим оценкам: энтальпия восходящего потока «Основной» – 1432 кДж/кг (вода 314 °C), энтальпия «Северо-Восточного» восходящего потока – 1406 кДж/кг (вода 311 °C), интервалы между трещинами – 4,5 м, трещинная пористость – 0,36, нисходящий поток – 78 кг/с, сжимаемость песчаников и контактной зоны 1,4E-7 Па$^{-1}$. Хотя этот сценарий моделирования показывает повышенные значения температур (–7,9 °C), его можно считать приемлемым, учитывая неполное восстановление забойных температур, используемых для калибровки модели.

При указанных выше параметрах наблюдается соответствие модельных и фактических энтальпий продуктивных скважин центральной части Мутновского месторождения: скв. 26, 016, 24, 029W, 4E, 013, 042 (рис.4). Сравнение значений модельных и фактических давлений, вычисленных по данным уровня воды в 11 скважинах – сценарий 12-NS-EX-6, также показывает их соответствие (0,3 бар), что приемлемо с учетом неопределенности расчетного давления по данным измерения уровня воды скважин в условиях высокотемпературных месторождений.

Заключение. Выполнена рекалибровка численной TOUGH2-EOS1-модели Мутновского геотермального месторождения [11] с использованием данных по естественному состоянию и данных по истории эксплуатации за 1984-2006 годы. Процесс рекалибровки с использованием инверсионного моделирования iTOUGH2-EOS1 показывает хорошую сходимость с фактической энтальпией добычных скважин, которая отражает объемные свойства резервуара, и позволяет уточнить характеристики резервуара.

Проницаемость резервуара на порядок выше, чем та, что была задана на модели 1996 г., особенно в нижней части модели, ассоциирующейся с интрузивной контактной зоной (600-800·10^{-15} м^2 на глубине –750-1250 м); приток метеорных вод в центральную часть месторождения в процессе эксплуатации более 80 кг/с; расходы реинжекции оцениваются значительно ниже суммарного

DOI: *10.18454/PMI.2017.2.163*

расхода отбора теплоносителя; восходящие потоки более горячие (314 °С) и их расход больше (+50 %), чем предполагалось прежде; параметры двойной пористости показывают относительно гомогенную природу геотермального резервуара (расстояние между трещинами 5 м, трещинное пространство $N \cdot 10^{-3}$).

Благодарности. *Авторы выражают признательность Ю.Ф.Манухину и Агентству полезных ископаемых Камчатки за предоставление фактических данных для моделирования Мутновского месторождения. Авторы также выражают признательность С.Финстерле за консультации по использованию программы iTOUGH2. Работа выполнена при поддержке РНФ по проекту 16-17-10008 и РФФИ по проекту 15-05-00676.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вакин Е.А.* Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района / Е.А.Вакин, И.Т.Кирсанов, Т.П.Кирсанова // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Изд-во ДВНЦ, 1976. С. 85-114.

2. *Гавриленко Г.М.* Пятнадцать лет из жизни вулкана Мутновского / Г.М.Гавриленко, Д.В.Мельников // Природа. 2008. № 2. С. 54-58.

3. Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм / Под ред. В.М.Сугробова. М.: Наука, 1986. 209 с.

4. *Кирюхин А.В.* Моделирование эксплуатации геотермальных месторождений. Владивосток: Дальнаука, 2002. 216 с.

5. *Леонов В.Л.* Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.

6. *Селянгин О.Б.* Новое о Мутновском вулкане // Вулканология и сейсмология. 1993. № 1. С. 17-35.

7. *Finsterle S.*, iTOUGH2 User's Guide: Report LBNL-40040 / Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, California, 1999. 130 p.

8. *Finsterle S.* iTOUGH2 Command Reference: Report LBNL-40041 / Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, California, 1999. 233 p.

9. *Finsterle S.* iTOUGH2 Sample Problems: Report LBNL-40042 / Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, California, 1999. 88 p.

10. *Kiryukhin A.V.* High temperature fluid flows in the Mutnovsky hydrothermal system, Kamchatka // Geothermics. 1993. Vol. 23. N 1. P. 49-64.

11. *Kiryukhin A.V.* Modeling Studies: the Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia // Geothermics. 1996. Vol. 25. N 1. P. 63-90.

12. *Povarov O.A.* Experience of Creation and Operation of Geothermal Power Plants in Cold Climate Conditions / O.A.Povarov, A.I.Nikolsky // Proc. World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005. P. 1-9.

13. *Pruess K.* TOUGH2 User's Guide, version 2.0, Report LBNL-43134 / K.Pruess, C.Oldenburg, G.Moridis. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. 1999. 197 p.

***Авторы*: А.В.Кирюхин**, *д-р геол.-минерал. наук*, *профессор*, *AVKiryukhin2@mail.ru* (*Санкт-Петербургский государственный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **О.О.Усачева**, *младший научный сотрудник*, *LeL89@yandex.ru* (*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*, *Петропавловск-Камчатский*, *Россия*).

Статья принята к публикации 19.01.2017.