

УДК 556.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОРЯКСКО-АВАЧИНСКОМ ВУЛКАНОГЕННОМ БАСЕЙНЕ**Кирюхин А.В., Черных Е.В., Рычкова Т.В.***Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,**Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: avk2@kscnet.ru***Аннотация**

Для обоснования представлений о пространственном распределении и свойствах систем флюидных резервуаров в пределах Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна используется ГИС-анализ (MapViewer-6). ГИС-модель Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна, включает цифровую модель рельефа, цифровую геологическую карту масштаба 1:200000, данные по термоминеральным и холодным источникам подземных вод, данные по гидрогеологическим скважинам и данные из каталога сейсмических данных по сети из 7-ми сейсмических станций КФ ГС РАН в районе Корякско-Авачинской группы вулканов (2000–2008 гг.). Уточнена геометрия резервуара «К», приуроченного к постройке Корякского вулкана. Резервуар фиксируется объемным распространением сейсмической активности, разгрузкой термальных источников и фумарол в привершинной части Корякского вулкана. Доступная для бурения эксплуатационных скважин площадь в плане >3 км².

Для численного термогидродинамического моделирования применялась программа RetraSim, решаются тестовые термогидродинамические задачи, применительно к предполагаемым условиям эксплуатации геотермального резервуара «К2». Анализ тестовой задачи RFP 3D Contour в диапазоне пористости 0.01–0.40 и начальной температуры 180–300°C показывает возможность эксплуатации в течение 30 лет с расходом теплоносителя от 184 до 218 кг/с км², при этом продукция пара может составить от 8.7 до 35.0 млн. тонн, продукция воды от 165.3 до 174.7 млн. тонн, товарная продукция от 53.5 до 65.9 млрд. руб.

Введение

Вулканы Авачинский и Корякский расположены в 25–30 км от города Петропавловска-Камчатского с населением около 250 тыс. чел., вмещают в своих недрах значительные ресурсы подземного тепла и подземных вод, а также представляет потенциальную опасность (конус Авачинского вулкана возник 3500 лет тому назад и имел 15 извержений в историческое время (с 1737 г.), вулкан Корякский продемонстрировал значительную активизацию фумарольной деятельности в период 2008–2009 гг).

Анализ гидрогеологических условий только изученных фрагментов Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна (Быстринское месторождение подземных вод и Пиначевский экстрезивный ВБ) показал, что они обладают суммарными ресурсами подземных вод 4.15 м³/с. Существуют геолого-геофизические предпосылки для приблизительной оценки магматического очага под Авачинским вулканом в форме эллипсоида: положение верхней кромки магматического очага оценивается в пределах интервала от нулевой отметки уровня моря и не ниже 2 км от этого уровня, размер горизонтальной и вертикальной полуосей эллипсоида по изотерме 900°C не меньше 2.3 и 1.53 км, по изотерме 700°C – 4.5 км и 3 км соответственно [4].

В данной работе предпринята попытка на основе анализа доступных пространственно координированных топографических, геологических, гидрогеологических и сейсмологических данных (ГИС анализа) обосновать вероятное размещение флюидных резервуаров в

пределах Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна и выполнить тестовое моделирование применительно к условиям эксплуатации одного из предполагаемых высокотемпературных резервуаров.

Исходные данные для ГИС Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна

ГИС-модель Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна (ВБ), включает цифровую модель рельефа, цифровую геологическую карту масштаба 1:200000, данные по термоминеральным и холодным источникам подземных вод, данные по гидрогеологическим скважинам и каталог сейсмических данных по сети из 7-ми сейсмических станций КФ ГС РАН в районе Корякско-Авачинской группы вулканов (2000–2008 гг).

Цифровая модель рельефа содержит абсолютные отметки поверхности рельефа на сетке с разрешением 0.008° по широте и 0.017° по долготе, что приблизительно соответствует разрешению 100 м. На модели рассматривается бассейн Корякско-Авачинской группы вулканов, ограниченный береговой линией Тихого океана, Авачинской бухты, реками Авача и Налычева. В целом площадь ограничена координатами 52°56' – 53°41' с. ш. и 158°08' – 159°16' в.д.

Цифровая модель гидросети базируется на карте гидросети масштаба 1:200000.

Цифровая 2D модель геологического строения Корякско-Авачинского ВБ бассейна основана материалах геологического картирования М 1:200 000 [5, 6] и включает 17 геологических подразделений (табл. 1).

Как будет показано ниже, с точки зрения формирования продуктивного геотермального резервуара, значительный интерес представляет купольный вулканогенный комплекс,

Таблица 1. Стратификация вулканогенно-осадочных отложений Корякско-Авачинского ВБ по данным [5, 6].

1	Q _{IVav}	Авачинский вулкан – поздняя фаза. Потоки базальтов, андезитов, андезибазальтов, андезитов, шлаки, пески (150м)
2	Q _{IVkr}	Корякский вулкан – поздняя фаза. Потоки оливиновых базальтов, андезитов, вулканические пески, шлаки, агглютинаты (до 100м)
3	αQ _{IV}	Аллювиальные, делювиально-пролювиальные, лахаровые, морские, озерно-болотные, ледниковые отложения, Пески, валунники, галечники, суглинки, супеси, илы, торфяники (до 30м)
4	pQ _{IV}	Пролювиальные отложения. Галечники, пески, валунники, супеси, суглинки, щебень и глыбы, торф (до 30м)
5	mQ _{IV}	Морские отложения. Галечники, пески, валунники, супеси, суглинки, щебень и глыбы, торф (до 30м)
6	bQ _{IV}	Озерно-болотные отложения. Галечники, пески, валунники, супеси, суглинки, щебень и глыбы, торф (до 30м)
7	Q _{III-IV}	Потоки базальтов, андезибазальтов, шлаки (до 200 м)
8	Q _{III³⁻⁴ak}	Авачинско-Козельский вулканический массив. Покровная фация: андезибазальты, вулканические пески, шлаки, тефroidы, супеси, пемзы и жерловые образования и экструзии андезитов, дацитов. Возраст – 29,9–33,6 тыс. лет (до 500м)
9	Q _{III³⁻⁴kr}	Корякский вулкан – ранняя фаза. Покровная фация: базальты, андезибазальты, андезиты, агглютинаты (100–200 м)

Продолжение таблицы 1.

10	gQ_{III}^4	Ледниковые и вводно-ледниковые отложения второй стадии послечетвертичного оледенения. Глыбы, валунники, галечники, суглинки, супеси, редко глины, пески (>40м)
11	Q_{III}^3	Аллювиальные межстадиальные отложения. Пески, галечники, гравий
12	gQ_{III}^2	Ледниковые и вводно-ледниковые отложения первой стадии послечетвертичного оледенения. Глыбы, валунники, галечники, суглинки, супеси, пески, гравий (>60м)
13	$\alpha\zeta Q_{II-III}kp$	Купольный ВК – ранняя фаза, экструзии андезитов и риолитов. Жерловые образования андезитов, дацитов и риолитов (α, ζ, λ)(>200–500 м)
14	βQ_{Epn}	Пиначевский ВК – покровная фация: базальты, андезибазальты, их туфы и субвулканические тела базальтов. Возраст по палеомагнитным данным древнее 0,73 млн.лет (600 м)
15	αN_{2kt}	Китхойский ВК – покровная фация: агломератовые туфы среднего состава, андезибазальты и субвулканические тела андезитов, К-Аг возраст 2,61–3,02 млн. лет (до 1000м)
16	N_{Ipa}	Ветловский вулканический комплекс. Песчаниково-алевролитовая ассоциация. Алевролиты, аргиллиты, песчаники, гравелиты, мелко обломочные брекчии, конгломераты, кремнистые алевролиты, тектонические глыбы кремнистых известняков, андезитов, туфов, кремней.
17	K_2nk_2	Кумрочская серия. Верхняя пачка. Туфобрекчии, туфоконгломераты, лавобрекчии, туфы мелкообломочные, лавы андезитов, андезитобазальтов (700м)

включающий экструзии андезитов и риолитов, жерловые образования андезитов, дацитов и риолитов (мощность > 200–500 м). Отобранный из него образец АК 28–09–2009 по данным лабораторных исследований в ТО СургутНИПИнефть характеризуется следующими параметрами: пористость (по гелию) 0.1216, пористость по воде 0.120, пористость по керосину 0.120, проницаемость 25.4 мД, проницаемость по Клинкенбергу 23.4 мД. По данным пикнометрических исследований в ИВиС ДВО РАН – минералогическая плотность – 2.72 г/см³, пористость – 0.119 (О.М. Топчиева). Петрографическое определение (по С.В. Шадринной, ТО СургутНИПИнефть) – дацит.

Данные по термопроявлениям в пределах Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна. Информация по термопроявлениям – необходима для определения на модели зон разгрузки теплоносителя и для калибровки термогидродинамических моделей, она включает их координаты, расходы, температуры, химический состав (который может быть использован для расчета глубинных температур по гидрохимическим термометрам: Na-K, Na-K-Ca и др.) и гидроизотопный состав (используется для выяснения отметок областей питания). Эта информация включает данные из каталога Е.А. Вакина, Г.Ф. Пилипенко (2005) (без GPS-привязки и без отдельного определения Na и K). Информация уточнена в процессе полевых работ в 2007–2009 г: осуществлена GPS-привязка отдельных термальных источников, выполнен полный химический и гидроизотопный анализ по основным источникам, установлено, что режим некоторых источников (расход, температура) существенно изменился (вероятно, в связи с активизацией Корякского вулкана в декабре 2008 г). Всего в пределах бассейна выявлено 25 групп термальных источников и два фумарольных поля (рис. 1).

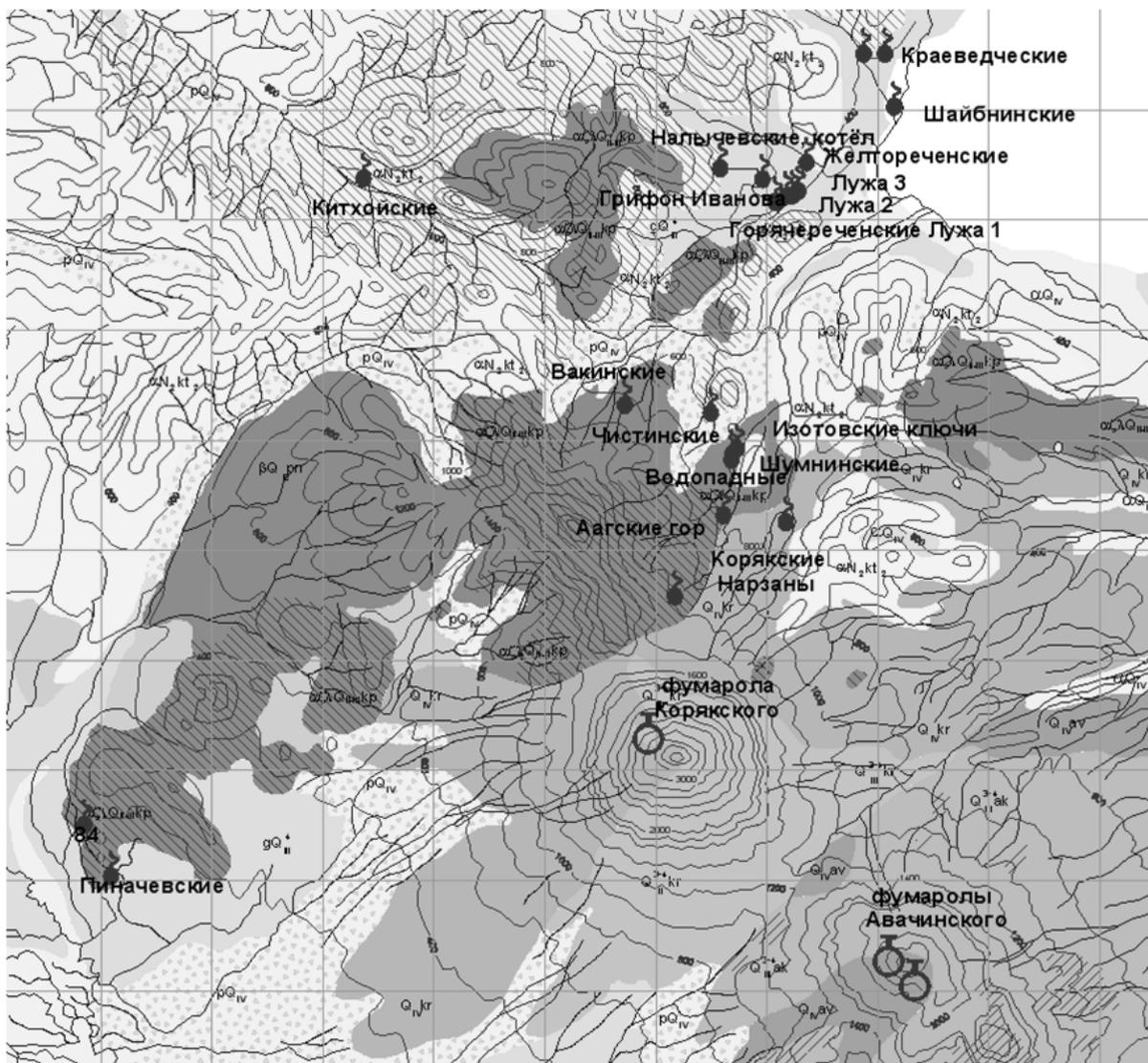


Рис. 1. Распределение термоминеральных источников и фумарол (по материалам Е.А. Вакина, Г.Ф. Филипенко, 2005, с дополнениями А.В. Кирюхина) в пределах Корякско-Авачинского ВБ. Геологические подразделения показаны с индексами, соответствующими табл. 1. Разметка через 5 км.

Особый интерес представляет активизация фумарольной деятельности Корякского вулкана. По данным [1] Корякский вулкан в конце 2008 г. – начале 2009 г. выносил 50–150 кг водного флюида в секунду, что соответствовало средней тепловой мощности 300–400 МВт. За четыре месяца извержения (конец декабря 2008 г. – конец апреля 2009 г.) вулкан Корякский вынес ~ 1.5 млн. т водного флюида. Температура, измеренная дистанционно во время извержения на устье нижней фумаролы составила около 400°C.

Данные по холодным источникам подземных вод в пределах Корякско-Авачинского ВБ. Распределение постоянно действующих холодных источников подземных вод необходимо для определения на модели зон разгрузки подземных вод и пьезометрической поверхности, определяющей подошву зоны неполного водонасыщения, в некоторых

случаях оценки глубинных температур по геотермометрам. Характеристики холодных источников определены по данным [3], всего в пределах бассейна зарегистрировано 69 постоянно действующих холодных источников подземных вод.

Данные по геолого-поисковым и гидрогеологическим скважинам. Данные по гидрогеологическим скважинам включают температуры, давления, результаты откачек подземных вод и распределение геологических подразделений в разрезе, что необходимо для калибровки модели по начальному состоянию, зонирования и определения фильтрационно-емкостных и петрофизических свойств элементов модели, соответственно. В связи с этим, систематизирована информация по трем группам скважин: (1) Геологопоисковые и гидрогеологические скважины (17 скважин), описанные в материалах отчета по гидрогеологической съемке [3, 5, 6]; (2) Разведочные (47 скв.) и эксплуатационные (10 скв.) гидрогеологические скважины, описанные в материалах отчета [2], изученные при разведке Быстринского месторождения подземных вод.

Использование каталога сейсмических данных КФ ГС РАН для выявления активного объема продуктивных геотермальных резервуаров. По аналогии с геотермальным месторождением Какконда (Япония) пространственные границы активного объема продуктивных геотермальных резервуаров с температурой до 350°C устанавливаются по данным распределения землетрясений, фиксирующихся образованием трещин при изменении флюидного давления. По данным из каталога землетрясений КФ ГС РАН (http://data.emsd.iks.ru/avhquake/index_r.htm) за 2000–2009 гг в пределах Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна выявлены два потенциальных продуктивных геотермальных резервуара: резервуар «А» (в конусе вулкана Авачинский выше уровня моря) и резервуар «К» (в юго-западной части постройки вулкана Корякский, в диапазоне глубин от –2 до 5 км абс. площадью около 48 км²) и подводный магматический канал Корякско-Авачинской группы вулканов (фиксируется под вулканом Корякский на абс. отм. ниже –5 км в виде зоны с северо-северо-восточного простирания протяженностью около 10 км и шириной до 1.5 км). Анализ распределения землетрясений показал активизацию геотермального резервуара «К» в 2008 г, которая сопровождалась последующим парогазовым извержением Корякского вулкана (декабрь 2008–2009 гг).

Резервуар, фиксирующийся объемным распространением сейсмической активности (потенциальный продуктивный геотермальный резервуар) выше уровня моря находится в конусе вулкана Авачинский (резервуар «А»), он труднодоступен для разбуривания, т.к. в целом характеризуется абсолютными отметками топографической поверхности выше 1000 м.

В диапазоне отметок от 0 до –2 км значительных по объему резервуаров, фиксирующийся объемным распространением сейсмической активности (потенциальных продуктивных геотермальных резервуаров) не выявлено, здесь четко фиксируются лишь корневые части резервуара «А» в осевой части Авачинского вулкана.

В диапазоне отметок от –2 км до –5 км четко проявлен резервуар, фиксирующийся объемным распространением сейсмической активности в западной части постройки вулкана Корякский (резервуар «К»), в плане он охватывает площадь 12 × 4 км. Это потенциальный продуктивный геотермальный резервуар.

Глубже отметки –5 км проявлен подводный магматический канал Корякско-Авачинской группы вулканов. Он фиксируется под Корякским вулканом в сечении в виде зоны северо-северо-восточного простирания протяженностью около 12 км и шириной до 1.5 км.

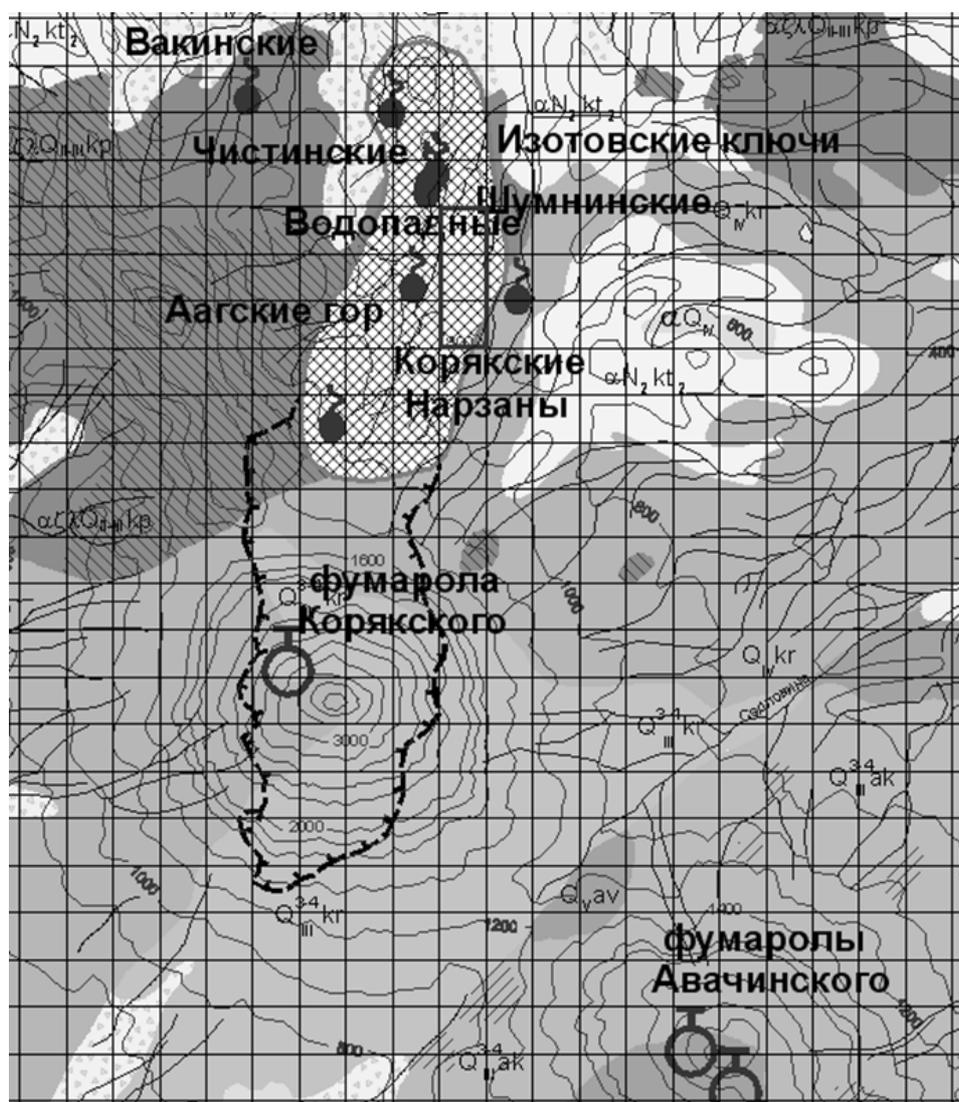


Рис. 2 Контуры резервуара «К», включая прилегающую зону активизации сейсмической активности в 2008–2009 гг (ограничена пунктирной линией с бергштрихами) и область латерального растека гидротерм, фиксирующуюся разгрузкой термальных источников (перекрестная штриховка). Прямоугольником показана зона, доступная для бурения эксплуатационных скважин. Сетка карты – 1 км.

Использование ГИС Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна для диагностики резервуара «К»

Для характеристики предполагаемого в районе Корякского вулкана геотермального резервуара к активному объему, характеризующимся фумарольной деятельностью в привершинной части вулкана и образованием трещин при сейсмической активизации 2008–2009 гг (резервуар «К») очевидно надо присоединить сейсмически пассивный объем, включающий участки разгрузки горячих источников (Аагских, Водопадных, Чистинских, Изотовских, Шумнинских).

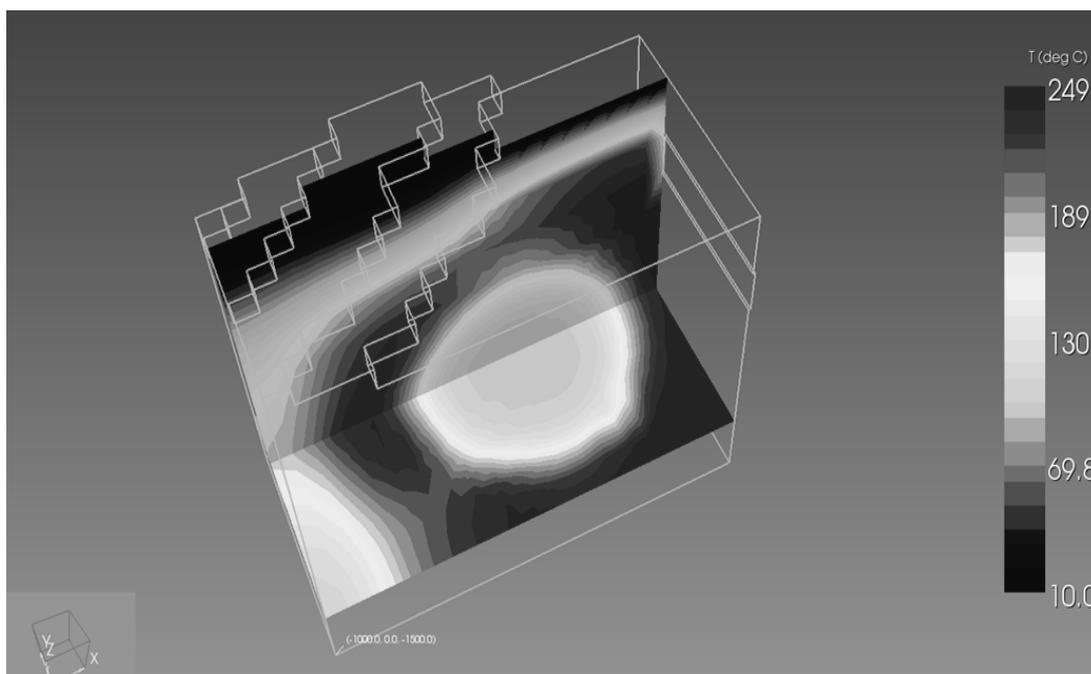


Рис. 3 Пример PetraSim-моделирования тестовой задачи RFP 3D contour применительно к эксплуатации резервуара «К». Распределение температуры в геотермальном резервуаре в конце 30-летнего периода эксплуатации.

Структурно-геологический контроль резервуара «К» осуществляется приконтактной зоной экструзивного риолито-дацитового комплекса средне-верхнеплейстоценового возраста (№13, табл. 1). Петрофизические характеристики экструзивного комплекса определяются следующим образом.

Температура в резервуаре «К» оценивается по SiO_2 и Na/K геотермометрам с учетом данных по химическому составу горячих источников. Результаты анализов находятся в обработке. В южной части резервуара температура может достигать 400°C (температура нижней фумаролы Корякского вулкана).

Область водного питания резервуара «К» определяется по гидроизотопным данным. Результаты анализов находятся в обработке.

Доступная для бурения эксплуатационных скважин площадь в плане может составить более 3 км^2 (рис. 2).

PetraSim – моделирование в связи с эксплуатацией резервуара «К»

Для моделирования использована тестовая задача RFP 3D contour с учетом влияния рельефа поверхности и притока глубинного теплоносителя [7]. В указанной тестовой задаче рассматривается безотходная эксплуатация геотермального резервуара с использованием двух добычных скважин и одной реинжекционной на участке $2 \times 1 \text{ км}$. В связи с неопределенностью исходных параметров выполнялось многовариантное технико-экономическое моделирование. В качестве неопределенных параметров рассматривались пористость резервуара (предполагаемый диапазон изменения $0.01\text{--}0.40$) и расход восходящего потока глубинного теплоносителя ($0\text{--}50 \text{ кг/с}$). По каждому из вариантов моделирования определялись максимальный расход отбора теплоносителя Q_{max} (кг/с), продукция пара P_S и воды

P_W (млн. тонн при давлении сепарации 6 бар), товарная продукция М (млрд. руб.) на срок эксплуатации 30 лет.

Анализ тестовой задачи RFP 3D Contour в указанном выше диапазоне показывает возможность эксплуатации в течение геотермального резервуара в течение 30 лет с расходом теплоносителя от 184 до 218 кг/с км², при этом продукция пара может составить от 8.7 до 35.0 млн. тонн, продукция воды от 165.3 до 174.7 млн. тонн, товарная продукция от 53.5 до 65.9 млрд. руб.

Адаптацию тестовой задачи RFP 3D Contour к условиям Корякско-Авачинской группы вулканов необходимо выполнить с учетом влияния рельефа реальной поверхности и полученных в результате полевых работ 2007–2009 гг данных по термальным источникам Налычевского Природного Парка, для определения материальных свойств и зонирования модели необходимо построение гидрогеологических разрезов, проходящих через Корякский и Авачинский вулканы (два разреза: северо-восточного направления и северо-западного направления).

Адаптация тестовой задачи RFP 3D Contour к условиям Корякско-Авачинской группы вулканов с учетом влияния рельефа поверхности и полученных в результате полевых работ 2007–2009 гг данных по термальным источникам Налычевского Природного Парка. Несмотря на то, что участок моделирования входит в ООПТ Налычевского парка, проработка возможности эксплуатации резервуара «К» в связи с расширением рекреационных возможностей Парка, использования геотермальных скважин для мониторинга состояния Корякского вулкана и связи его активности с режимом геотермального резервуара – представляются актуальными.

Заключение

1. Для обоснования представлений о пространственном распределении и свойствах систем флюидных резервуаров в пределах Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна используется ГИС-анализ (MapViewer-6). ГИС-модель Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна, включает цифровую модель рельефа, цифровую геологическую карту масштаба 1:200000, данные по термоминеральным и холодным источникам подземных вод, данные по гидрогеологическим скважинам и данные из каталога сейсмических данных по сети из 7-ми сейсмических станций КФ ГС РАН в районе Корякско-Авачинской группы вулканов (2000–2008 гг). Уточнена геометрия резервуара «К», приуроченного к построению Корякского вулкана. Резервуар фиксируется объемным распространением сейсмической активности, разгрузкой термальных источников и фумарол в привершинной части Корякского вулкана. Доступная для бурения эксплуатационных скважин площадь в плане >3 км².

2. Для численного термогидродинамического моделирования применялась программа PetraSim, решаются тестовые термогидродинамические задачи, применительно к предполагаемым условиям эксплуатации геотермального резервуара «К2». Анализ тестовой задачи RFP 3D Contour в диапазоне пористости 0.01–0.40 и начальной температуры 180–300°C показывает возможность эксплуатации в течение 30 лет с расходом теплоносителя от 184 до 218 кг/с км², при этом продукция пара может составить от 8.7 до 35.0 млн. тонн, продукция воды от 165.3 до 174.7 млн. тонн, товарная продукция от 53.5 до 65.9 млрд. руб.

Список литературы

1. *Иванов В.В.* Извержение вулкана Корякский (Камчатка) в конце 2008 – начале 2009 г.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития извержения \ \ Сборник материалов конференции, посвященной Дню Вулканолога, март 2009.
2. *Репех Н.А., Бережной В.А., Ланина Л.А.* №5604 «Отчет о результатах предварительной разведки Восточного участка Быстринского месторождения пресных подземных вод, проведенной в 1987–1991 гг. (с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 1.08.91 г.)»
3. *Серезников А.И., Лазарев В.А.* №6045 «Отчет о результатах гидрогеологического доизучения с инженерно-геологическими и геоэкологическими исследованиями картографированием М 1:200 000, проведенного на территории листа №57–27 в 1991–1996 гг.» ФГУ ТФИ 2000 г.
4. *Федотов С.А., Сугробов В.М., Уткин И.С., Уткина Л.И.* Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электро снабжения // // Вулканология и сейсмология. 2007, № 1. С. 32–46.
5. *Шеймович В.С., Панфилова И.М.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Южно-Камчатская серия. Геологическая карта N57–XXI (Северные Коряки). СПб, ВСЕГЕИ, 2000, л.1–2
6. *Шеймович В.С., Паришина Г.Н., Пежемская Н.П.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Южно-Камчатская серия. Геологическая карта N57–XXVII (Петропавловск-Камчатский). СПб, ВСЕГЕИ, 2000, л.1–2
7. PetraSim Example Manual //Thunderhead engineering. 2007, p.133