

**ПРОДУКТИВНЫЕ ГЕОФЛЮИДНЫЕ (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, НЕФТЬ, МАГМА) РЕЗЕРВУАРЫ**

**Кириухин А.В.<sup>1</sup>, Воронин П.О.<sup>1</sup>, Журавлев Н.Б.<sup>1</sup>, Кириухин П.А.<sup>2</sup>, Поляков А.Ю.<sup>1</sup>, Рычкова Т.В.<sup>1</sup>,  
Усачева О.О.<sup>1</sup>, Федотов С.А.<sup>1</sup>, Черных Е.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия,

E-mail: AVKiryukhin2@mail.ru

<sup>2</sup>ЭПАМ, Санкт-Петербург, Россия

**АННОТАЦИЯ:** Рассматриваются механизмы формирования и функционирования продуктивных геофлюидных резервуаров: (1) Гидротермальной системы Долины Гейзеров; (2) Паратунского геотермального района; (3) Гидротермальной системы Корякского вулкана; (4) Мутновского геотермального района; (5) Магматических питающих систем активных вулканов (Толбачик, Авачинско-Корякский кластер, Мутновский, Ключевская группа); (6) Нефтяные резервуары в вулканогенных (Рогожниковский, Зап. Сибирь) и интрузивных (Белый Тигр, Вьетнам) массивах; (7) Водно-метановые резервуары Камчатки.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГЕЙЗЕРОВ [1-3]

Естественные гейзеры (источники, циклически извергающие кипящую воду) обнаружены лишь в нескольких районах Земного шара, наиболее известные из них расположены в Исландии (бассейн Хаукадалур), США (Йеллоустонский национальный парк, Нов. Зеландии (Роторуа) и в России (Кроноцкий Заповедник). Наблюдения за режимом гейзеров начались с простого визуального подсчета количества извержений в день (начиная с 1937 г. в Йеллоустоне) и продолжают в настоящее время с использованием температурных логгеров, обеспечивающих непрерывную запись, с 2003 г.

Механизм цикличности концептуально объяснялся и экспериментально доказывался на трех основных моделях: (1) камерная модель (или модель с ловушкой для пара) (Rinehart, 1980; Vandemeulebrouck et al., 2013, 2014), (2) скважинная модель (Дрознин, 1980; Ingebritsen et al., 1996; Lu et al., 2005), и (3) модель смешения (Steinberg et al., 1981, Saptadji, 1995). Нами были воспроизведены соответствующие численные модели (Ingebritsen et al., 1996), объясняющие цикличность гейзеров на 2D модели с высокопроницаемой зоной глубокого заложения (скважинная модель) и объясняющие цикличность на модели с притоками из горячего и холодного резервуаров (Saptadji, 1995) (модель смешения). Но при измельчении вычислительной сетки цикличность исчезла в обоих рассматриваемых выше случаях.

Гейзер Великан (Долина Гейзеров, Камчатка), один из наиболее ярких примеров гейзерной активности: интервал между его извержениями, сопровождающимися выбросом  $\approx 20$  тонн кипящей воды в течение 30-40 с на

высоту 15-20 м, составлял 4-7 часов, но особую интригу составляли промежуточные вскипания (plays) с интервалом 15-20 мин. Во время промежуточных вскипаний в ванне гейзера на 1-2 минуты возникал кипящий грифон высотой 0.5-1.0 м, но терминального извержения при этом не происходило. Механизм длительного возбуждения гейзера с отложенным терминальным извержением заслуживал специального научного исследования, которое началось 21-27.07.2007 г., когда в канале гейзера Великан была помещена труба с установленными на ней двумя логгерами температуры (труба уперлась в основание канала на глубине 5.3 м).

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для понимания механизма извержений гейзера Великан были использованы две TOUGH2-модели (примечание: TOUGH2 – стандартная программа для моделирования многофазной неизотермической геофильтрации) с одинаковой геометризацией канала гейзера и прилегающего проницаемого геотермального резервуара. Разница в моделях заключалась в том, что в первом случае в качестве флюида рассматривался двухкомпонентный флюид (H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>), а во втором случае – однокомпонентный флюид (H<sub>2</sub>O). На обеих моделях удалось воспроизвести указанные выше записи температуры с использованием внешних циклически изменяющихся граничных условий (приток глубинного теплоносителя и возвратной воды в канал гейзера). Но, если в первом случае на модели воспроизводились двухфазные условия (необходимые для извержения гейзера), то во втором случае система находилась в однофазном состоянии.

Таким образом, для объяснения на модели механизма извержений гейзера Великан потребова-

лось учесть наличие  $\text{CO}_2$  в свободной фазе, т.к. температуры кипения в канале гейзера при соответствующих давлениях водяного столба не достигались. В итоге – модель, описывающая изменения температуры в канале гейзера Великан, включает в качестве нижнего граничного условия циклическое поступление  $\text{CO}_2$  (с интервалом 15-20 мин., каждый импульс  $\text{CO}_2$  «весит» 15 кг).

### 3. ПАРАТУНСКАЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ СИСТЕМА [4-5]

Паратунские геотермальные месторождения приурочены к вулканогенным резервуарам в грабенах рек Паратунка и Карымшина, они являются примерами низкотемпературных гидротермальных систем метеорного происхождения. Изотопный состав термальных вод ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) указывает на то, что областью их водного питания включает структуру Вилючинского вулкана (2173 м абс.) и приподнятые участки кальдеры в верховьях р. Карымшина.

Геомеханический анализ геометрии продуктивных зон Паратунского геотермального резервуара показывает, что он сформирован в условиях радиального раятияжения ( $S_v > S_{H\max} = S_{H\min}$ ) и активизация продуктивных зон возможна при избыточном давлении 10 бар (что близко к начальному флюидному давлению в резервуаре). Такое избыточное давление может быть создано при циркуляции с приподнятыми областями водного питания, что инициирует формирование трещин гидроразрыва в продуктивном геотермальном резервуаре и гидравлическую связь между Вилючинским вулканом и Паратунскими геотермальными месторождениями, находящимися на расстоянии 10-25 км. Замкнутая форма термоаномалий и отсутствие температурных инверсий в геотермальных резервуарах указывают на то, что источники теплового питания находятся под продуктивными геотермальными резервуарами.

С целью оценки фильтрационно-емкостных параметров и граничных условий Паратунского продуктивного резервуара разработана 3D численная термогидродинамическая-трассерная TOUGH2-модель. Модель сформирована на полигональной вычислительной сетке и включает 8 слоев и 9727 элементов. Начальные распределения температуры и давления, история изменения температур, давлений и концентраций хлор-иона в добычных скважинах в период 1966-2014 гг. были использованы для калибровки модели с использованием программы iTOUGH2. В результате получены наиболее ве-

роятные оценки фильтрационно-емкостных параметров резервуара: горизонтальная проницаемость продуктивного резервуара до 1.41 D, вертикальная проницаемость до 0.17 D, сжимаемость до  $4.08 \times 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$ ; приток глубинного теплоносителя с температурой 80-111 °C составляет 190 кг/с. Инверсионное моделирование также подтвердило: (1) Верхнее граничное условие на кровле продуктивного резервуара (Дирихле, с сезонным изменением температуры) с площадной разгрузкой через относительный водоупор в приповерхностный горизонт грунтовых вод; (2) Открытую восточную границу (Дирихле, на модели заданы элементы с фиксированным состоянием), с возможным примыканием еще одного продуктивного резервуара, насыщенного хлоридными водами; (3) Отсутствие существенных изменений температуры в добычных скважинах во время эксплуатации; (4) Двойную пористость продуктивного резервуара, проявляющуюся при кратковременных сезонных вариациях давления.

Прогнозное моделирование до 2040 г с расходом эксплуатации 256 кг/с показывает незначительное понижение давления в резервуаре (0.7 бар) и несущественное понижение температуры на Паратунском геотермальном месторождении. Верхне-Паратунское геотермальное месторождение, являющееся аналогом Паратунского по продуктивности может удвоить продукцию, в случае начала его эксплуатации.

Анализ эксплуатации Паратунских геотермальных месторождений с использованием погружных насосов в добычных скважинах для теплоснабжения Елизово, Вилючинска и Петропавловска Камчатского (242 тыс. чел.) является актуальной задачей. Использование невосстановленной в ночное время электроэнергии Мутновской ГеоЭС (установленная мощность 62 MWe) и 300 кг/с неиспользуемой отсепарированной воды с температурой 160 °C является дополнительным благоприятным фактором для осуществления расширенного проекта геотермального теплоснабжения.

### 4. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВАЧИНСКО-КОРЯКСКОГО КЛАСТЕРА [9, 10]

Условия водного питания Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна изучены с использованием данных по изотопному составу воды ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) и углерода в свободном газе  $\delta^{13}\text{C}$ . Изотопный состав ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) термоминеральных источников (Корякские Нарзаны, Изо-

товские и Пиначевские) и скважин Быстринского и Елизовского месторождений подземных вод указывает на то, что область водного питания находится на отметках от +2000 до +2500 м абс. (ледники Корякского и Авачинского вулканов). Водное питание Чистинских Нарзанов происходит из центральной части Пиначевского экструзивного массива (вулканы Арик и Аар) с отметок от 800 до 500 м абс. Изотопный состав углерода в свободном газе  $\delta^{13}\text{C}$  в Корякских Нарзанах и Изотовском источнике свидетельствует о магматическом происхождении. Таким образом, углекислые источники на северо-западном склоне Корякского вулкана формируются в результате смешения магматических газов и тающих вод ледников. Гидротермальный резервуар под северным склоном Корякского вулкана характеризуется температурами от 253 до 333°C и газосодержанием  $\text{CO}_2$  до 3 г/кг (Корякский Нарзан).

Процесс сейсмической активизации 02.08.2011 в районе Изотовского горячего источника (7 км от вершины Корякского вулкана), интерпретируемый как внедрение дайки, подтверждается повышением температуры источника на 10-12 °C в период с октября 2011 г. по июль 2012 г.

Концептуальное TOUGH2 моделирование использовано для понимания и объяснения механизма формирования гидротермальной системы под Корякским вулканом. В связи с этим, следующие модельные параметры оказались наиболее важными: (1) источники теплогенерации 20 MW/km<sup>3</sup> и газогенерации ( $\text{CO}_2$ ) 10 г/с/км<sup>3</sup>, действующие в течение 7000 лет в указанных выше зонах инъекции магмы; (2) водное питание с расходом 580 кг/с через жерла вулкана в зоны инъекции даек. Результаты моделирования соответствуют оценкам Na-K геотермометров (300°C), данным по изотопному составу воды ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), свидетельствующим о высоком положении области водного питания, концентрации магматического  $\text{CO}_2$  (до 4 г/кг) в термоминеральных источниках на северном склоне Корякского вулкана, термическому влиянию при инъекции дайки 02.08.2011, зарегистрированному на Изотовском термоминеральном источнике и разбавлению исходной морской воды в фундаменте Корякского вулкана в результате нисходящей циркуляции холодных вод. Моделирование также показывает возможность скрытого высокотемпературного резервуара под южным склоном Корякского вулкана (на отметках от

-1 км абс.), что может являться целью последующего разведочного бурения.

## 5. МУТНОВСКАЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ СИСТЕМА [6]

По данным изучения изотопного состава воды ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) водное питание продуктивных геотермальных резервуаров и горячих хлоридных источников до начала их промышленной эксплуатации осуществлялось за счет тающего ледника Мутновского вулкана (+1500 м абс.) через жерло Мутновского-3. Выявлены признаки притока в продуктивный резервуар более тяжелых ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) вод из верхнего горизонта локальных метеорных вод после 12-ти лет эксплуатации.

Установлено, что Мутновский продуктивный геотермальный резервуар с температурой 260-310°C и объемом 16 км<sup>3</sup> приурочен к пересечению нормальных разломов NNE- и NE-простирающихся (плоско-ориентированные продуктивные зоны), что соответствует выявленной геометрии инъекций даек (см. ниже).

Применение iTOUGH2-моделирования позволило оценить фильтрационно-емкостные свойства продуктивного Мутновского резервуара: проницаемость 90-600 мД, приток глубинного теплоносителя 80 кг/с с энтальпией 1420 кДж/кг. Моделирование также использовано для воспроизведения истории эксплуатации Мутновского резервуара начиная с 2000 г. с фактической продукцией 48 MWe в 2016 г., прогнозное моделирование показывает возможность устойчивой продукции 65-83 MWe до 2055 г, при условии бурения дополнительных скважин в SE части резервуара. Продукция может возрасти до 87-105 MWe в случае применения бинарных технологий. Моделирование также показывает чувствительность прогнозных оценок к величине притока из верхнего горизонта локальных метеорных вод.

Концептуальное 2D iTOUGH2-EOS1sc термогидродинамическое моделирование Мутновской магмо-гидротермальной системы объясняет ее формирование в течение 1500-5000 лет за счет теплового питания при инъекции даек из активного жерла Мутновского-4 и водного питания через жерла потухших вулканов Мутновский-3 и Мутновский-2. Это является примером того, как активный вулкан осуществляет водное и тепловое питание прилегающей гидротермальной системы, когда его активность трансформируется от продукции лавы на поверхности к инъекции магмы и воды в прилегающие

структуры. Моделирование также указывает на возможность существования скрытого проницаемого геотермального резервуара с температурой 300°C под Мутновским геотермальным месторождением на отметках -5000 to -4000 м абс., что может рассматриваться в качестве целей разведочного бурения.

## 6. МАГМАТИЧЕСКИЙ ФРАКИНГ ПОД АКТИВНЫМИ ВУЛКАНАМИ [7-11]

Анализ спутниковых интерферометрических данных до и после извержения Толбачинского вулкана позволяет объяснить наблюдаемые деформации земной поверхности на модели одиночной дайки (угол падения 80 град на ЗСЗ с максимальным раскрытием 6–8 м, локализованной вблизи поверхности в районе эруптивных трещин). Последующий анализ локальной сейсмичности (данные КФ ФИЦ ЕГС РАН) во время извержения Толбачинского вулкана 2012 г. рассматривает плоско-ориентированные кластеры микроземлетрясений как результат инъекции магмы с формированием даек и силлов (магматический фракинг). Пространственно-временной анализ сейсмичности (с использованием программы Frac-Digger), предшествующей извержению 27.11.2012 показывает следующее: извержению Толбачинского вулкана предшествовала инъекция магмы с внедрением даек ЗСЗ простирания на глубинах от -4 до +3 км абс. На площади к востоку от вулкана Плоский Толбачик. После вскрытия субгоризонтальной проницаемой зоны на абс. отм. 0 инъекция магмы происходила в форме силлов, далее сформировалась дайка через которую магма вышла на поверхность (угол падения 50°, азимут падения 300°) в 5.5 км от эпицентра начальной зоны инъекции магмы. Наличие неглубокозалегающих кластеров с углами падения менее 30°, не попадающих в зону сдвигового разрушения на диаграмме Мора – указывает на существование частично расплавленных магматических очагов и (или) проницаемых стратиформных резервуаров в структуре Толбачинского вулкана.

Анализ локальной сейсмичности в пределах Авачинско-Корякской группы вулканов в период 2000-2016 гг. позволяет выявить последовательность плоско-ориентированных кластеров землетрясений, интерпретируемых как процесс внедрения даек и силлов. Инъекции магмы идентифицируются в следующих зонах: (1) неглубокозалегающий коровый магматический очаг в юго-западной части Корякского вулкана

состоящий из комбинации даек и силлов в диапазоне глубин от -2 до -5 км абс.; (2) зона аккумуляции даек в субмеридиональной зоне (7.5 x 2.5 км) в диапазоне глубин от -2 до -5 км абс.; (3) неглубокозалегающий магматический очаг в конусе Авачинского вулкана в диапазоне отметок от 1 до 2 км абс. Наиболее активная магматическая деятельность синхронизирована с парогазовым извержением Корякского вулкана 2008-2009 гг. (преобладающие глубины внедрений от -5 до -2 км абс.), после чего процесс инъекции магмы переместился в конус Авачинского вулкана 2010-2016 гг. (преобладающие глубины внедрений от 1 до 2 км абс.). Геометрия магматических тел отражает геомеханические условия растяжения в фундаменте Корякского вулкана с доминированием вертикальных напряжений  $S_v$ , причем максимальное горизонтальное напряжение  $S_{Hmax}$  ориентировано в северном направлении.

Результаты CFRAC-моделирования инъекции магмы в трещину в условиях характерных для фундамента Корякского вулкана (режим нормальных разломов, угол падения 60°, размеры 2 x 2 км<sup>2</sup>, глубина – 4 км ниже уровня моря). Результаты моделирования при расходе магмы 2000 кг/с в течение 1 сут. показывают: раскрытие трещины до 0.06 м, сдвиговые деформации с генерацией от десятков до первых сотен землетрясений с магнитудой до 4.8. Таким образом доказано, что плоско-ориентированные кластеры землетрясений под активными вулканами могут указывать на процессы магматического фракинга или инъекции даек. Тем не менее, различная статистика зарегистрированных (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и модельных землетрясений указывает на необходимость изучения дополнительных сценариев инъекции магмы под активными вулканами, включая режимы с изменяющимся во времени расходом инъекции магмы и другие возможные варианты.

Анализ плоско-ориентированных кластеров землетрясений под Мутновским вулканом показывает 74 плоско-ориентированных кластера локальных землетрясений в пределах Мутновско-Гореловской группы вулканов по данным КФ ФИЦ ГС РАН (2009-2017 гг), интерпретируемых как дайки, наклонные дайки и силлы. Большая часть магматических инъекций осуществляется в СВ секторе Мутновского вулкана на площади 2 x 10 км<sup>2</sup> и в диапазоне глубин от -4.0 до -2.0 км в условиях горизонтального сжатия (RF, reverse fault conditions), часть даек внедряется непосредственно под Мутновским

продуктивным резервуаром на глубинах от -6.0 до -4.0 км в условиях горизонтального растяжения (NF, геомеханические условия нормальных разломов).

## 7. РОГОЖНИКОВСКИЙ НЕФТЯНОЙ ВУЛКАНОГЕННЫЙ РЕЗЕРВУАР [12]

Механизм образования продуктивных резервуаров в риолитах рассматривается на примере Рогожниковского вулканогенного нефтяного резервуара (Зап. Сибирь) и объясняется в терминах TOUGHREACT-моделирования длительной гидротермальной циркуляцией с химическим взаимодействием вода-порода, что приводит к увеличению проницаемости-пористости вдоль высокотемпературных потоков и заканчивается окончательным samozапечиванием сформированного продуктивного резервуара. Наблюдаемые в настоящее время давление, температура, фазовые условия, распределение проницаемости-пористости, химический состав флюидов и предполагаемый минеральный состав начальной породы (вулканическое стекло) используются как исходные данные для последующего TOUGHREACT-моделирования. Моделирование Рогожниковского резервуара на упрощенной прямоугольной модели  $500 \times 500 \times 400 \text{ м}^3$ , состоящей из 100 элементов, показывают, что длительная гидротермальная циркуляция приводит к увеличению пористости ( $\times 2.64$ ) и проницаемости ( $\times 50$ ) благодаря замещению исходного вулканического стекла кварцем, альбитом и К-полевым шпатом; ранняя стадия гидротермальной циркуляции ( $< 10$  тыс лет) отмечается кипением и значительным падением давления, а заключительная стадия характеризуется значительным отложением кальцита в основании восходящего потока, после чего происходит samozапечивание резервуара. Это показывает возможность образования продуктивных резервуаров благодаря преобразованию исходного минерального состава в риолитах, вызванному гидротермальной циркуляцией, обнаруживают условия кратковременного падения давления на ранней стадии формирования резервуара (что благоприятно для привлечения нефти и рудообразующих флюидов в резервуар). Samozапечивание резервуара на последней стадии гидротермальной циркуляции благоприятно для аккумуляции и удерживания флюидов в продуктивном резервуаре и формирования месторождений полезных ископаемых. Для более детального анализа Рогожниковского нефтяного резервуара разра-

ботана 3D TOUGHREACT модель, описывающая его реальную геометрию в области размерами  $5.5 \times 6 \text{ км}^2$ , состоящая из 672 активных элементов. В этой модели гидротермальная проработка резервуара рассматривается при расходе восходящего потока теплоносителя 720 кг/с и энтальпии 1530 кДж/кг ( $320^\circ\text{C}$ ) на интервале времени 0-2 млн. лет. Результаты моделирования в целом подтверждают полученный ранее на упрощенной модели механизм образования продуктивных резервуаров в вулканогенных породах риолитового состава, закономерности изменения эволюции термогидродинамического режима, фильтрационно-емкостных свойств и ассоциаций вторичных гидротермальных минералов.

Таким образом, механизм образования продуктивных резервуаров в риолитах объясняется в терминах TOUGHREACT-моделирования длительной гидротермальной циркуляцией с химическим взаимодействием вода-порода, что приводит к увеличению проницаемости-пористости вдоль высокотемпературных потоков и заканчивается окончательным samozапечиванием сформированного продуктивного резервуара. Условия кратковременного падения давления на ранней стадии формирования резервуара благоприятны для привлечения нефти и рудообразующих флюидов. Samozапечивание резервуара на последней стадии гидротермальной циркуляции благоприятно для аккумуляции и удерживания флюидов в продуктивном резервуаре.

## 8. НЕФТЯНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ В ГРАНИТНОМ МАССИВЕ БЕЛЫЙ ТИГР (ВЬЕТНАМ) [13]

Перераспределение нефти в гранитных интрузиях рассматривается с использованием TOUGH2 - T2VOC-моделирования. Показана возможность устойчивого концентрирования нефтяной фазы в верхней части нефте-пароконденсатного гидротермального резервуара за счет транспорта нефтяной компоненты в верхнюю часть разреза в газовой фазе с последующим удалением водной составляющей за счет нисходящего потока водной фазы в диапазоне температур  $240\text{-}285^\circ\text{C}$  и давлений 63.5-69.5 бар (механизм вертикальной тепловой трубы с разнонаправленной циркуляцией газовой и жидкой фаз при прогреве снизу). При последующем остывании, масса нефтяной фазы значительно увеличивается за счет конденсации нефти из газовой фазы. В частности, на модели размерами  $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}^2$  с петрофизиче-

скими и фильтрационно-емкостными параметрами близкими к гранитному массиву нефтяного месторождения Белый Тигр (Вьетнам) и начальным равновесным распределением нефтяной компоненты в трех фазах (водной  $S_w=0.4$ , газовой  $S_g=0.699$  и нефтяной  $S_o=0.001$ ) в результате пароконденсатной переработки по механизму тепловой трубы в верхней части разреза формируется устойчивая линза с нефтяной фазой мощностью 80 м ( $S_o=0.6$ ) и массой 2.00 млн. тонн. При последующем остывании до 90-115°C и естественном заводнении нижней части разреза, масса нефтяной фазы увеличивается до 3.49 млн. тонн за счет конденсации нефти из газовой фазы. Предложенный и подтвержденный моделированием механизм формирования нефтяной залежи в гранитном фундаменте месторождения Белый Тигр в результате вертикальной восходящей миграции нефтяной фазы в пароконденсатных условиях в составе высокотемпературного флюида соответствует минералого-петрографическим особенностям коллекторских зон, химическому составу воднорастворимых нефтей фундамента, гидрохимической зональности и химическому составу подземных вод месторождения Белый Тигр.

#### 9. ВОДНО-МЕТАНОВЫЕ ЗАЛЕЖИ В ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНАХ КАМЧАТКИ [14]

Зоны внедрения магмы, питающей Корякский и Авачинский вулканы фиксируются по сейсмическим данным в диапазоне глубин - 6.0 ÷ +2.0 км абс. и -1.5 ÷ +2.5 км абс., соответственно сопряжены с водно-метановыми резервуарами, которые примыкают к магматическим резервуарам вулканов с юго-востока и юго-запада, площадь потенциального накопления метана со значительными газовыми ресурсами оценивается в ~ 650 км<sup>2</sup>. Формирование газовых залежей под вулканами может происходить в результате геомеханического и термического воздействия магмы на вмещающие вулканогенно-осадочные породы, содержащие органическое вещество различного происхождения.

На разрезах Кшукского водно-метанового месторождения (Зап. Камчатка) хорошо просматриваются особенности распределения газонасыщенных резервуаров: (1) Повсеместное массивное распространение газоносности в нижней части Этолонской свиты и в кровле подстилающих ее формаций; (2) Локальное массивное распределение газоносности в Эрмановской свите, форма газоносного резервуара

напоминает трубу, которая могла унаследовать геометрию каналов вулканического аппарата или гидротермальной системы. Восходящая циркуляция подтверждается также положительными аномалиями 3D распределения давления и температуры (102°C на абс. отм. - 2500 м). Естественно предположить, что при восходящей циркуляции газонасыщенных флюидов газовой фазой заполняются более проницаемые резервуары в зонах восходящих потоков. Сквозная циркуляция газонасыщенных флюидов подтверждается однородным изотопным составом  $\delta^{13}C$  метана (-38‰ – -36,9‰), этана (-25,8‰ – -25,6‰) и  $CO_2$  (-33,1‰ – 30,7‰) в диапазоне глубин -1100 – -2500 м абс), что характерно для газогенерации метана в зонах повышенных температур. Доля потенциально газонасыщенных резервуаров (определенных по сейсмическому атрибуту Variance) в общем объеме Этолонского целевого горизонта составляет от 5,4% до 15,7% при площади около 40 км<sup>2</sup>.

Таким образом, формирование водно-метановых залежей в районах современного вулканизма происходит в условиях восходящей гидротермальной циркуляции и в зонах термоконтрактового взаимодействия магматических питающих систем активных вулканов с вмещающими вулканогенно-осадочные породы, содержащими органическое вещество различного происхождения.

*Работы выполнялись при поддержке РФФ по проекту 16-17-10008 и РФФИ по проектам 15-05-00676, 18-05-00052.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, I.K. Dubrovskaya Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // Applied Geochemistry Journal, Applied Geochemistry 27 (2012) 1753-1766.
2. A. Kiryukhin. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 323, p. 129-147, 2016.
3. A. Kiryukhin, V. Sugrobov, E. Sonnenthal. Geysers Valley  $CO_2$  Cycling geological Engine (Kamchatka, Russia) // Geofluids Journal, 2018, 17 p. <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/aip/1963618/>
4. А. В. Кирюхин, Н. П. Асаулова, Л. А. Ворожейкина, П. О. Воронин, Н. В. Обора, П. А. Кирюхин Условия формирования и моделирование эксплуатации Паратунского геотермального месторождения (Камчатка) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2017, № 3. – С. 16-30.
5. Kiryukhin A.V., Vorozheikina L.A., Voronin P.O., Kiryukhin P.A. Thermal-Permeability structure and recharge

conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia // *Geothermics* 70 (2017) 47–61.

6. Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O., Kiryukhin P.A. Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.02.010

7. P. Lundgren, A. Kiryukhin, P. Milillo, S. Samsonov. Dike model for the 2012-2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 307 (2015) 79–88.

8. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 2016. № 5. – С. 1-18.

9. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А., Черных Е.В. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // *Вулканология и сейсмология*. 2017. № 5. – С. 3-17.

10. A. Kiryukhin, V. Lavrushin, P. Kiryukhin, P. Voronin "Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia)," *Geofluids*, vol. 2017, Article ID 4279652, 21 p., 2017. doi:10.1155/2017/4279652.

11. А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин Магматические системы и условия глубинной гидротермальной циркуляции Ключевской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и термогидродинамического моделирования // *Вулканология и Сейсмология*, №4, 2018 (в печати).

12. Кирюхин А.В., Шадрин С.В., Пузанков М.Ю. Моделирование термогидрогеохимических условий формирования продуктивных резервуаров в вулканогенных породах // «*Вулканология и сейсмология*», 2013, № 2. – С. 90-104.

13. Кирюхин А.В., Киреева Т.А. Формирование нефтяного резервуара в условиях пароконденсатной гидротермальной системы (по результатам численного моделирования на примере месторождения Белый Тигр, Вьетнам). «*Геология нефти и газа*», #1, 2015 г. – С. 78-86.

14. Кирюхин А.В., Воронин П.О., Корзун Н.И. Водно-метановые резервуары вулканогенных бассейнов. Сборник КГТУ, 2015, с.23-33. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-31-23-33.

## PRODUCTIVE GEOFLUID (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, OIL, MAGMA) RESERVOIRS

**Kiryukhin A.V.<sup>1</sup>, Voronin P.O.<sup>1</sup>, Zhuravlev N.B.<sup>1</sup>, Kiryukhin P.A.<sup>2</sup>, Polyakov A.Y.<sup>1</sup>, Rychkova T.V.<sup>1</sup>, Usacheva O.O.<sup>1</sup>, Fedotov S.A.<sup>1</sup>, Chernykh E.V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006 Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip 9*

<sup>2</sup> *EPAM, 196084 St-Peterburg, Zastavskaya 22-2, Mega-Park*

*e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru*

ABSTRACT: Mechanism of Kamchatka geofluid systems functionality was studied: (1) Geysers Valley hydrothermal system; (2) Paratunsky geothermal area; (3) Koryaksky hydrothermal system; (4) Mutnovsky geothermal area; (5) Magma fracking systems of active volcanoes (Tolbachik, Koryaksky-Avachinsky cluster, Mutnovsky); (6) Oil reservoir in volcanogenic (Rogozhnikovsky) and intrusive (White Tiger) rocks; (7) Water-methane reservoirs of Kamchatka.