

Информация о конференциях по Программе научного бурения глубоких скважин (ICDP) (Потсдам, Германия) и о Международном Геотермальном Конгрессе (WGC-2005) (Анталия, Турция).

30 марта - 1 апреля 2005 г в Центре Геонаучных Исследований GFZ г. Потсдам (Германия) прошла конференция посвященная десятилетию ICDP (International Continental Drilling Program) – Программе научного бурения глубоких скважин на континентах. В финансировании программы принимают участие Германия, Япония, США, Исландия, Китай, Чехия и др. страны. Пленарные заседания были посвящены следующим проблемам: (1) Изменения климата, (2) Метеоритные кратеры, (3) Геобиосфера, (4) Вулканические системы и термические режимы, (5) Мантийные плюмы и рифтообразование, (6) Активные разломы, (7) Зоны коллизии и конвергенции плит, (8) Природные ресурсы. В работе конференции принимали участие такие известные ученые как Rolf Emmerman (GFZ, Potsdam), Mark Zoback (Stanford University), Kozo Uto (GSJ, Japan), J. Eichelberger (UAF, USA), Don DePaolo (UCB, USA) и другие.

Указанные выше проблемы представляют интерес для устойчивого и безопасного развития человеческой цивилизации, а их решение невозможно без постановки глубокого научного бурения на континентах. Например, на поверхности Земли насчитывается 170 крупных метеоритных кратеров, предполагается, что в результате взрыва во время образования одного из них (кратер Чиксулуб в Мексике диаметром около 200 км) произошло массовое вымирание динозавров. Разбуривание этого кратера позволит получить информацию о термогидродинамических условиях и палеоклиматических последствиях взрыва, и «подготовиться» к прилету следующего крупного метеорита.

Выяснение механизма тепломассопереноса в зонах внедрения магматических тел чрезвычайно важно для оценки геотермальных ресурсов и для оценки вулканической опасности. Не случайно в последние годы в Японии (где около 125 млн. чел. проживает в непосредственной близости от зоны активного вулканизма) осуществлены два крупных проекта, нацеленных на решение указанной выше проблемы. Первый из них осуществлен на геотермальном месторождении Какконда (80 МВт эл.), где в 1996-99 гг пробурена скважина глубиной 4.5 км на вскрытие магматического тела, являющегося источником теплового питания геотермального месторождения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует граница определяемая изотермой 350-360°C, разделяющая область вязко-пластических деформаций (550°C), характеризующуюся низкой проницаемостью и многофазными включениями рассолов CO₂-H₂S, Cl-Na состава, от области хрупких деформаций, где возможно получение пароводяной смеси из продуктивных трещин. Другой японский проект был осуществлен в 2000-2004 гг на активном андезитовом вулкане Унзен, где в результате направленного бурения 4-х скважин была вскрыта питающая магматическая система вулкана (система даек и пирокластических жил), но она уже остыла до 200°C, а сам магматический очаг выявлен геофизическими методами в стороне на глубине 15 км. Аналогичные проекты с финансированием в десятки млн. долл. осуществляются в США (кальдера Лонг Вэлли), Италии и Исландии.

Понимание процессов, происходящих в зонах активных разломов необходимо для разработки методов прогноза землетрясений. Разбуривание активного разлома Сан-Андреас в Калифорнии, США (сдвиги по этому разлому приводят к землетрясениям с магнитудой более 7.0) сопровождается проходкой нескольких наклонных стволов, пересекающих плоскость разлома, в которых будут размещены сейсмометры,

деформометры, наклонометры и датчики порового давления, что позволит выявить сигналы, предшествующие сильным землетрясениям.

В докладе А. Кирюхина и J. Eichelberger отмечено, что остаются не вполне понятными условия сосуществования активных вулканов и гидротермальных систем. Например, Мутновский вулкан и Мутновское геотермальное месторождение находятся в 5-8 км друг от друга на одной проницаемой трещине, которая используется для транспорта магмы и водного теплоносителя. Возможно ли увеличение мощности теплового питания геотермального месторождения при его эксплуатации за счет Мутновского вулкана и можно ли таким способом повлиять на активность вулкана – одна из проблем требующих дальнейшего изучения. ICDP принято решение провести по этой проблеме специальный семинар «Научное бурение Мутновской магмо-гидротермальной системы: выяснение взаимосвязи между магмой и гидротермами», который состоится на Камчатке осенью этого года.

Интересными были также доклады, связанные с технологиями освоения гигантских месторождений газогидратов на Аляске, бурению глубокой 5-км скважины на п-ве Рекиясс (Исландия) для извлечения суперкритических флюидов (температура более 350°C на глубине 4-5 км), разбуриванию кровли мантийного плюма на Гавайских островах.

Половина последнего дня конференции оказалась свободной от докладов, что позволило осмотреть участникам конференции живописные, украшенные дворцами и античными скульптурами парки Потсдама – бывшую резиденцию германских императоров.

24-29 апреля 2005 г в Анталии (Турция) состоялось еще одно значительное научное событие – Международный Геотермальный Конгресс (WGC-2005). Актуальность использования геотермальной энергии возрастает по мере увеличения цены органических энергоносителей, а также с учетом Киотского протокола, регламентирующего квоты выбросов CO₂ (каждая тонна CO₂ выброшенная в атмосферу обойдется производителю в 5 долл. США).

За три дня до начала конгресса состоялись короткие курсы по теме «Разработка геотермального проекта». Спонсором проведения курсов был Мировой Банк, в котором создан Геотермальный Фонд в размере 3.2 млрд. долл. США. Геотермальный бизнес, как и всякое новое дело, нуждается в начальном импульсе. В качестве такого импульса может быть использован кредит. Например, строительство и быстрый ввод в эксплуатацию Мутновской ГеоЭС на Камчатке мощностью 50 МВт в 2000-2002 гг были осуществлены за счет кредита ЕБРР 99.8 млн. долл. США. МБ, в лице своего российского консультанта А. Аверченкова, заявил что согласен оказывать финансовую поддержку по следующим позициям: (1) предпроектная оценка геотермальных ресурсов, (2) технико-экономическое обоснование геотермального проекта, (3) бурение геотермальных скважин, (4) испытания геотермальных скважин. Очень интересные и содержательные лекции были сделаны также J.Lovekin (GeothermEX, USA), G. Bloomquist (Washington Univ., USA). Существенное увеличение эффективности разведки геотермальных месторождений может быть получено при бурении “Slim Holes” –скважин с небольшим диаметром (51 мм) и глубиной в первые сотни м, все шире применяются бинарные ГеоЭС, которые позволяют использовать для получения электроэнергии геотермальные месторождения с температурой 100-200°C с эффективностью использования теплоносителя от 50 до 12 кг/с на МВт эл.

В работе WGC приняло участие 1500 специалистов из 83 стран, было представлено около 700 докладов в форме устных сообщений и постеров. Председателем конгресса был James Koenig (США), спонсорами проведения – Международная геотермальная ассоциация (президент – J. Lund, США), и Турецкая геотермальная ассоциация – (O. Mertoglu). Все доклады проходили 1.5 годовую процедуру отбора, рецензирования и редактирования. После первого дня пленарных заседаний работа конгресса проводилась по параллельным техническим секциям, которые включали следующие проблемы и направления, связанные с изучением и использованием геотермальной энергии: (1) Обзор по странам, (2) Экология и социальные аспекты, (3) Юридические аспекты, (4) Финансово-экономические аспекты, (5) Устойчивость эксплуатации, (6) Геология, (7) Геофизика, (8) Геохимия, (9) История эксплуатации, (10) Бурение, (11) Инженерия резервуаров, (12) Реинжекция, (13) Генерация энергии, (14) Прямое использование, тепловые насосы, (15) Комбинированные системы, (16) Новые технологии (HDR, EGS), (17) Программное обеспечение, (18) Неотектоника, (19) Гидрогеология, (20) Коррозия, (21) Бальнеология и туризм, (22) Энергетическая политика, (23) Теплоснабжение и сельское хозяйство, (24) Управление эксплуатацией, (25) Разведка.

В обобщающих докладах по использованию геотермальной энергии отмечалось, что в настоящее время общемировая установленная мощность ГеоЭС составляет 8900 МВт эл (фактически используемая – 8000), что соответствует среднегодовому приросту 12% за период 2000-2005 гг, R. Bertani). Общее использование геотермальной энергии составляет 72 622 ГВт-часа в год (8290 МВт тепл.), включая тепловые насосы (33%), теплоснабжение (29%), бассейны (20%), тепличное хозяйство (7.5%), сельское хозяйство (4%), промышленные процессы (4%) и др. (J. Lund).

Как показывает опыт США, в правовом отношении геотермальная энергетика нуждается в поддержке включая разнообразные льготы по налогообложению основных средств, в том числе уже долгое время лоббируется законопроект о TPC (Tax Production Credit), который бы позволил геотермальным компаниям не платить налог с прибыли и выйти по цене за 1 кВт-час на уровень газовой промышленности – 5с.

Устойчивый режим эксплуатации геотермальных месторождений возможен, но в большинстве случаев для его обеспечения необходимо бурение дополнительных эксплуатационных скважин, т.к. расход отбора флюида в среднем на порядок превышает естественный приток глубинного теплоносителя в геотермальный резервуар (S. Sanjal). При этом принципиально выделяются три режима эксплуатации геотермальных месторождений в зависимости от расхода отбора: (1) возобновляемый, (2) устойчивый (с бурением дополнительных эксплуатационных скважин) и (3) коммерческий-неустойчивый (при котором бурение дополнительных скважин не дает эффекта и экономически нецелесообразно). По данным эксплуатации 35-ти геотермальных месторождений соотношение устойчивого расхода (эксплуатационных запасов) и возобновляемого (расход притока глубинного теплоносителя) составляет в среднем около 5.3. В каждом конкретном случае этот коэффициент зависит от гидрогеологических условий месторождения, планируемого времени эксплуатации и режима реинжекции.

Структурно-гидрогеологические условия геотермальных месторождений – ключ к эффективной эксплуатации и снижению затрат на бурение скважин: при низкой проницаемости массивов вмещающих горных пород, непродолжительной по времени и умеренной по интенсивности вулканической деятельности формируются в основном геотермальные резервуары трещинно-жильного типа (“single fault type geothermal

fields”) со средней продуктивностью в первые десятки МВт (Япония, Камчатка, Невада США), в мощных современных вулканогенных бассейнах Филиппин и Индонезии формируются геотермальные месторождения-гиганты, способные продуцировать сотни МВт электроэнергии. Два геотермальных пародоминирующих месторождения-гиганта: Гейзеры (США) 1400 МВт установленных (900 МВт фактических) и Лардарелло (Италия) 700 МВт, сформировавшиеся в осадочных бассейнах продолжают оставаться «исключениями» в геотермальном списке.

Пример перегрузки (полное выкипание жидкой фазы в геотермальном резервуаре с последующим резким падением давления и падением продукции эксплуатационных скважин) при эксплуатации геотермального месторождения Гейзеры (США) и положительный эффект реинжекции (начиная с 1999 г), позволившей стабилизировать продукцию (на 30% увеличить продуктивность по сравнению с вариантом без реинжекции) - показывает необходимость применения методов инженерии геотермальных резервуаров для понимания термогидродинамических и газогидрохимических процессов в ходе эксплуатации. Эффект перегрузки при эксплуатации достаточно явно проявлен также на геотермальном месторождении Мираваллес (Коста-Рика), где к 2003 г мощность ГеоЭС достигла 162.5 МВт.

Глобальная оценка наиболее вероятного значения технически доступного потенциала геотермальных ресурсов составляет 240 ГВт (для выработки электроэнергии), и 4400 ГВт (для прямого использования тепла) (V. Stefansson). Одна из стратегических целей US DOE (Министерства энергетики США) в области геотермальной энергетики – достижение рубежа 40 ГВт эл. (R. Mink). Кроме этого, предпринимаются попытки развития новых технологий для извлечения геотермальной энергии: (1) Технология HDR (Hot Dry Rock) извлечения энергии с помощью гидроразрыва «сухих горячих пород», Хиджиори, Япония, (2) Технология EGS (Enhanced Geothermal Systems) увеличения размеров существующего геотермального резервуара, что позволило например получить в Косо, Калифорния дополнительно 20 МВт эл., и др., (3) Технологии использования суперкритического флюида (Исландия).

Вычислительный код TOUGH2 (K.Pruess) стал стандартным языком, с помощью которого осуществляется проверка предположений об условиях теплового и водного питания геотермальных резервуаров, оценка эксплуатационных запасов геотермальных месторождений (sustainable capacity). Эти оценки дополняются анализом чувствительности и смешанно-параметрическими моделями (lumped-parameter models), что придает им большую наглядность. «Инженерный» подход к проблеме изучения геотермальных месторождений, основанный на применении численного моделирования (TOUGH2) позволяет оценить параметры источников теплового питания геотермальных резервуаров (тепловую мощность, в т.ч. расход восходящего потока глубинного теплоносителя и его энтальпию) на основе моделирования естественного состояния, что представляет собой процесс решения обратной задачи по обеспечению сходимости модельных и фактических значений температуры и давления в геотермальном резервуаре. При таком подходе нет необходимости в выяснении геометрии и состоянии питающих магматических систем, что представляет собой в большинстве случаев неразрешимую задачу. Для анализа совмещенных термогидродинамических-химических процессов в геотермальных резервуарах начинает все шире использоваться «дочерний код» TOUGH2 и EQ3/6 (химическая термодинамика) – TOUGHREACT.

Современное понимание процессов тепломассопереноса и химического взаимодействия в гидротермальных системах может быть представлено следующими

образом. Холодная метеорная вода из областей питания опускается по субвертикальным проницаемым зонам (разломы, жерла вулканов, контакты интрузий). На глубине эта вода преобразуется в высокотемпературный обогащенный NaCl и CO₂ «родительский геотермальный флюид» за счёт теплового и химического обмена с магматическими газами и вмещающими породами. Как правило исходный «родительский геотермальный флюид» в геотермальных системах имеет две компоненты: метеорную воду и магматический флюид. Магматический флюид глубинной генерации является поставщиком таких газов как HCl, HF, SO₂, H₂O, CO₂ и H₂S, которые преобразуются в форму NaCl-CO₂ флюида за счёт взаимодействия с вмещающими магматическими породами. Далее восходящие потоки теплоносителя поднимаются по проницаемым зонам («геотермальным резервуарам»), достигая земной поверхности в виде горячих источников и фумарол. Циркуляция от областей водного питания до областей разгрузки управляется перепадом давления и вариациями плотности флюида (вынужденная и свободная конвекция) и проницаемостью вмещающих горных пород. Двухвековая история развития представлений о механизме теплового и водного питания низкотемпературных геотермальных месторождений (А. Bjornsson) весьма поучительна. Итогом её является достаточно универсальная концептуальная модель, основанная на принципе «теплоизвлечения из массива вмещающих горных пород за счёт распространения трещины в массив по мере его охлаждения» (R. Bunzen, G. Bodvarsson).

Российское участие в конгрессе было представлено делегацией РАО ЕС России, АО «Геотерм», АО «Наука», сотрудниками институтов РАН и геотермальных компаний. Камчатку на конгрессе представляли: А.В. Кирюхин, С.Н. Рычагов, Е.Г. Калачева (ИВиС ДВО РАН), В.И. Лузин, И.И. Чернев (АО «Геотерм»), Н.И. Кирюхина (Камчатскбургеотермия). РАО ЕС организовало в Шератоне приём для участников конгресса, итоги которого в местной прессе назвали «русским прорывом» в геотермальной энергетике (имея в виду конечно недавний ввод в эксплуатацию Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт).

На заключительном заседании конгресса было объявлено о месте проведения следующего конгресса: им станет в 2010 г. о. Бали в Индонезии. После окончания конгресса состоялась полевая экскурсия на геотермальное месторождение Кизилдере (фото 1, разлом в известняках на границе грабена, температура 240°C, установленная мощность 20 МВт эл.) и горячие источники Памуккале (фото 2, на источниках 31-35°C, знаменитых мощными травертиновыми отложениями (CaCO₃), еще во времена Римской империи был город Хиерополис, до сих пор в хорошем состоянии сохранился амфитеатр, торговые ряды и бани на горячих источниках). Термальные бани производят впечатление толщиной своих стен, выложенных из блоков известняка для повышения теплоизоляции (фото 3). За день пришлось одолеть 600 км по горным дорогам, стараясь не отстать от автобусов с участниками экскурсии (все места в автобусах были зарезервированы задолго до начала конгресса, поэтому пришлось арендовать а/машину). В день отъезда удалось немного осмотреть Анталию, древний город, испытавший влияние Римской, Византийской и Османской империй: помимо древних достопримечательностей, мечетей и отелей - повсюду на крышах домов - панели солнечных батарей и бочки с водой, нагревающиеся от солнца, которого здесь хватает с избытком.

Зав. лабораторией тепломассопереноса
ИВиС ДВО РАН
Д.г.-м.н., проф.

А.В. Кирюхин



Фото 1. Геотермальное месторождение Кизидере (Турция): на переднем плане устье геотермальной скважины, оборудованное сепаратором, уступ на заднем плане – сброс (северное ограничение грабена Мендерс), контролирующей продуктивность геотермального резервуара.



Фото 2. Травертиновые отложения на горячих источниках Памуккале (Турция). На заднем плане грабен Мендерс, контролирующей размещение геотермальных месторождений (в том числе Кизилдере).



Фото 3. Руины римских термальных бань в городе Хиерополис (Турция) на термальных источниках Памуккале.