

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ (НА ПРИМЕРЕ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ)**

**Бобров С.П.¹, Хмелевской В.К.², Хуторской М.Д.³, Лубнина Н.В.², Новиков В.П.¹,
Петров В.Г.¹, Пушкарёв П.Ю.², Романовская М.А.², Шустов Н.Л.²**

¹ФБУ "Территориальный фонд геологической информации
по Центральному федеральному округу", Калужский филиал;

²Геологический факультет ФГОУ ВПО "Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова";

³Учреждение Российской академии наук Геологический институт РАН



Бобров С.П.

руководитель проекта
(грант № 11-05-97515),
к. г.-м. н., нач. отдела
ТФГИ по ЦФО

В пределах платформ "сухие", нагретые до температур 150–300 °С породы кристаллического фундамента залегают на глубинах порядка 10 км. Энергия этих "сухих" пород посредством закачивания в них поверхностных вод, нагревания и откачки их через эксплуатационные скважины может использоваться в петротермальных тепловых и электрических станциях. Работы были направлены на создание научных основ комплексирования геолого-геофизических исследований для петротермальной геоэнергетики, т. е. для выявления на территории области "тепловых куполов", где указанные температуры достигаются на меньших (5–8 км) глубинах. Использованы геолого-структурные данные, результаты магнитотеллурических зондирований и других методов геофизики.

Within cratons, "dry rocks", heated until 150–300 °C temperature, occur in crystalline basement at approximately 10 km depth. Energy of these "dry rocks", by means of injection of surface waters into them, and further water pumping out using exploitation boreholes, can be used for heating and electric power production. We started to develop scientific basis for integrated application of geological and geophysical methods for petrothermal energetics, which means detection of "heat domes", in which the abovementioned temperatures occur at smaller depth (5–8 km). Geological information, as well as magnetotelluric and other geophysical data were analyzed for this purpose.

Предлагаемая работа является актуальной для направления энергетики будущего, которое названо петротермальной геоэнергетикой [1]. Основана она на использовании энергии "сухих горных пород" земной коры на глубинах порядка 10 км. В отличие от гидротермальной геоэнергетики, использующей в качестве теплоносителя горячие подземные воды и пар, в петротермальной геоэнергетике источником энергии являются нагретые до 150–300 °С породы кристаллического фундамента. В них через глубокие скважины закачиваются поверхностные воды, которые после нагрева откачиваются через другие скважины и подаются для отопления при пониженных температурах (до 150 °С на глубине) или для выработки электроэнергии при повышенных температурах (до 300 °С). После очистки вода вновь закачивается в нагнетательные скважины, образуя циркуляционную систему.

Геотермические градиенты, характеризующие повышение температур за счёт горячих недр Земли, в среднем близки к 3 °С при погружении на 100 м. При этом в стабильных в тектоническом отношении зонах (на платформах) нагретые до указанных температур породы теоретически ожидаются на глубинах около 10 км.

В тектонически активных и вулканических областях эти глубины составляют сотни метров, и здесь давно развивается гидротермальная геознергетика.

По результатам геолого-геофизических исследований в тектонически стабильных зонах можно выявить так называемые "тепловые котлы" ("тепловые купола"), где нагретые до названных температур породы залегают на наименьших глубинах. Если они близки к 5 км, то петротермальная геознергетика в этих условиях может стать рентабельней, чем традиционная углеводородная. Для подобных геолого-геофизических исследований необходимо создавать петротермальную геофизику, включающую как глубинные геофизические методы для поисков и разведки "тепловых котлов", так и малоглубинные методы для инженерно-геологических и экологических изысканий при выборе площадок для строительства геотермальных станций и мониторинга их работы.

Созданию научных основ петротермальной геофизики и их применению на примере Калужской области посвящена эта статья.

Объект, предмет и физико-геологические основы петротермальной геофизики

Объектом исследования петротермальной геофизики является кристаллический фундамент континентальных платформ (глубины 5–15 км), а также осадочный чехол над фундаментом.

Предметом исследований петротермальной геофизики являются глубинные методы геофизики (гравиразведка, магниторазведка, сейсморазведка, электро-разведка магнитотеллурическими методами) и их малоглубинные варианты, а также ряд других методов электроразведки (сопротивлений, естественной и вызванной поляризации, низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные).

В качестве геологических подходов к теории петротермальной геофизики для создания физико-геологических моделей (ФГМ) и математического моделирования прямых и обратных задач, видимо, наиболее близкой является гипотеза геосолитонной водородной дегазации Земли (ГВДЗ) [2–4]. Она не противоречит многим существующим гипотезам и теориям о геотектоническом строении Земли (геосинклинальной, дрейфа континентов, ротационной, дегазации Земли, тектоники плюмов и др.). ГВДЗ интересна также инновационной направленностью на поиск углеводородного сырья (газа и нефти) неорганической (абиогенной) природы. Очевидно, что подобные представления об образовании газа и нефти, как и рудных (металлических) полезных ископаемых, тесно связаны с геотермическим режимом Земли. Это и позволило нам использовать гипотезу ГВДЗ в качестве обоснования возможностей и эффективности петротермальной геофизики, а затем строить теорию и методику интерпретации этого направления прикладной геофизики. Вольно цитируя одного из соавторов гипотезы ГВДЗ В.Р. Мегеря [4], мы под геосолитоном понимаем природное явление энергомассопереноса из глубоких недр Земли физических полей (электромагнитных, в том числе сверхвысокочастотных, инфракрасных, тепловых, упругих и др.) и массы (вещества) за счёт глубинного газа – водорода и флюидов (свободных вод) по столбоверетенообразным объектам, а также крутозалегающим линейным структурам (контактам, сбросам и др.).

На земной поверхности нередко наблюдаются квазиизометрические геолого-геофизические аномалии, кольцевые в плане с поперечным размером в сотни метров и километры, столбообразные по глубине структуры [2]. Часть из них (астро-блемы) связана с падением на Землю космических объектов с образованием метеоритных кратеров (глубина их сравнима с поперечными размерами). Часть же имеет глубокие "корни", прослеживаемые геофизическими методами на большие глубины. Они представляют собой расширяющиеся книзу квазивертикальные

столбы. В геотектонике подобные вулканогенно-тектонические образования называют субвертикальными зонами деструкции, трубками взрыва (диатермами), похожими на кимберлитовые трубки, диапирами и т. п. Возникновение их связано с горизонтально-неоднородными частями земной коры и мантии: контактами и блоками континентов; трещинами в блоках, образующимися за счёт вращения Земли; глубинными разломами [3].

Основной движущейся массой в трубках (геосолитонах) является глубинный водород [2–4], который отличается сверхтекучестью и высокой проницаемостью. Поэтому по любым трещинам он стремится вверх. В условиях высоких температур и давлений в мантии и ядре Земли водород распадается на протоны и электроны, т. е. образуется плазма из элементарных частиц положительного и отрицательного знаков, а значит, благодаря вращению Земли создаются электромагнитные поля разной частоты, в том числе крайне высокой, т. е. в виде инфракрасного – теплового излучения. Обладая высокой химической активностью, водород вступает в реакции с окружающими атомами и, проходя через разные минералы в земной коре, может образовывать новые минералы. Это служит определяющим фактором эндогенных процессов в недрах, в том числе при создании месторождений полезных ископаемых (углеводородных, металлических). Поиск эндогенных месторождений полезных ископаемых – это одно из направлений петротермальной геофизики.

Формирование ФГМ строения земной коры с учётом данной теории петротермальной геофизики – задача достаточно новая. Считается, что основными геометрическими моделями для поиска термально активных зон, где возможны повышенные температуры горных пород за счёт энеггомассопереноса из мантии на относительно малых глубинах, могут быть: линейные контакты перемещающихся блоков литосферы; линейные зоны глубинных разломов, их пересечения, одиночные и веерные; квазивертикальные столбообразные объекты (геосолитоны). Последние называются также вулкано-тектоническими структурами.

Предложенные ФГМ, как и другие геометрические модели трёхмерных слоисто-блоковых структур гидролитосферы, включая земную кору и верхнюю мантию, отличаются высокой тектонической гетерогенностью, разрушенностью, повышенной пористостью и проницаемостью слагающих их пород, а в результате – дегазацией, флюидизацией и появлением глубинного тепла. Фактически они представляют собой зоны энеггомассопереноса, в пределах которых могут увеличиваться тепловые потоки, электропроводность, изменяться плотность и скорость распространения упругих волн, теплопроводность, магнитные и ядерные свойства. Разная геометрия и физические свойства аномалообразующих объектов по сравнению с окружающей средой и образуют ФГМ для петротермальной геофизики.

Особенности геологического строения фундамента Калужской области

Стратиграфический разрез Калужской области и смежных с ней территорий представлен двумя резко отличающимися комплексами пород: *нижним* – кристаллическим фундаментом, сложенным метаморфическими образованиями архейского и позднепротерозойского возрастов, интенсивно дислоцированными и прорванными интрузиями магматических пород разного состава и возраста, и *верхним* – осадочным чехлом, залегающими на кристаллическом фундаменте с резким угловым несогласием. Для решения задач петротермальной геофизики и энергетики необходимо изучение геологии горизонтов, располагающихся на глубинах порядка 5–15 км и представленных породами кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Поэтому настоящий раздел отчёта содержит материал по стратиграфии и литологии только кристаллического фундамента (архей +

нижний протерозой). Раздел составлен по материалам обобщающих монографий по геологии и полезным ископаемым Калужской области, изданным участниками данного проекта В.Г. Петровым (2003) и С.П. Бобровым (2006) с дополнениями [5–7].

В пределах рассматриваемой территории кристаллический фундамент залегает на глубине от 350 до 1500 м и более и имеет блоковое строение. Фундамент вскрыт небольшим количеством скважин, представление о его строении базируется в основном на геологической интерпретации геофизических данных, а также на материалах изучения сопредельного района Курской магнитной аномалии, где породы фундамента охарактеризованы по керну многочисленных скважин.

Архейская группа. Представлена образованиями обоянской серии нижнего архея и михайловской серии верхнего архея. *Нижний архей.* *Обоянская серия* (AR_{1ob}) с возрастом пород более 3000 (?) млн. лет представлена серыми биотитовыми, амфибол-биотитовыми и амфиболовыми плагиогнейсами и в значительной мере гранитизированными и мигматизированными плагиоклазовыми и микроклиновыми гранитами, а также относительно маломощными телами плагиоклазовых амфиболитов и амфиболовых сланцев. Породы обоянской серии образуют древние "ядра консолидации" архейских кратонов. На Балтийском щите мощность аналогичных образований составляет выше 12 км. *Верхний архей.* Породы *михайловской серии* (AR_{2mh}) с возрастом 2600 ± 100 млн. лет образуют преимущественно линейно-вытянутые зеленокаменные пояса, облекающие "древние ядра" консолидации пород обоянской серии, а также самостоятельные жёсткие блоки позднеархейской консолидации (Малоярославецко-Тарусский и Тульский своды, Рузско-Щёлковский и Тумско-Шатурский выступы). Серия представлена амфиболитами, амфибол-биотитовыми сланцами, нередко мигматизированными, с прослоями кварц-магнетит-пироксеновых пород и железистых кварцитов *александровской свиты* (AR_{2al}) и эффузивно-осадочными, местами мигматизированными породами с телами коматиитов и кварц-пироксен-магнетитовыми породами *лебедевской свиты* (AR_{2lb}).

Протерозойская группа. Метаморфизированные породы *нижнего протерозоя* в пределах рассматриваемого района развиты в раннепротерозойских подвижных поясах, где они формируют линейно-вытянутые структуры, облекающие жёсткие блоки архейских кратонов и срединных массивов, и представлены *курской серией* (PR_{1rs}), залегающей с размывом на породах архея. В составе серии выделяются метатерригенная *игнатеевская свита* (PR_{1ig}), песчано-сланцевая *стойленская свита* (PR_{1st}) и *коробковская свита* (PR_{1kr}), представленная железистыми кварцитами, переслаивающимися со сланцами.

Магматические образования в кристаллическом фундаменте представлены как зеленокаменно-перерождёнными эффузивами, туфами основного-среднего состава и ультраосновными эффузивами типа коматиитов, принимающими участие в строении зеленокаменных поясов ранне- и позднеархейского возраста, так и интрузивными образованиями различных магматических комплексов, представляющих наибольший интерес для содержания проекта. В пределах Калужской области выделяются: 1) раннеархейские магматические формации мигматизированных гранитогнейсов и перидотит-пироксенит-габбровая формация (бесединский комплекс); 2) позднеархейские магматические формации: ультрабазитовая и амфиболит-габбродиабазовая позднеархейских зеленокаменных поясов (сергеевский и рождественский комплексы), плагиогранит-гранодиорит-мигматитовая (салтыковский комплекс); 3) раннепротерозойские магматические формации: тоналит-плагиогранитная и мигматитгранит-граносиенитовая (усманский, павловский и осколецкий комплексы); габбро-диоритовая и гранодиоритовая (стойло-николаевский комплекс); вулканоплутоническая габбро-долеритовая (трапповая)

(смородиновый комплекс); формация субщелочных гранитов и гранодиоритов (атаманский комплекс), сиенитовая и щелочно-сиенитовая (щебекинский и дубравинский комплексы).

Тектоника территории Калужской области определяется её положением в пределах ВЕП, северная её часть относится к Московской синеклизе, южная – к северному склону Воронежской антеклизы, а небольшая часть на северо-востоке области – к зоне Пачелмского (Рязано-Саратовского) прогиба (авлакогена). Поскольку настоящая работа нацелена на выделение термально активных зон в кристаллическом фундаменте и выявление в нём "тепловых котлов", наибольший интерес представляет строение фундамента территории, сформировавшегося в дорифейский этап становления земной коры и в рифейскую авлакогеновую стадию.

Дорифейский этап. Наибольший интерес в рамках проекта представляет интервал 1780–1750 млн. лет назад, т. к. именно в этот этап произошла финальная амальгамация (объединение) Фенноскандинавского и Волго-Сарматского сегментов ВЕП. Основная часть Калужской области занимает северную часть Сарматского сегмента (Воронежской антеклизы по осадочному чехлу); северная же часть области, соответствующая южной части Московской синеклизы, локализована в районе "шовных" зон – Торопец-Гагарин-Шарьинской (западная часть области) и Пачелмской (восточная часть области). Непосредственно в пределах Калужской области выделяются структуры более дробных порядков, наиболее крупными из которых являются Ельнинско-Спас-Деменский, Брянско-Барятинский и Плавский своды, разделённые Бетлицким и Ульяновским подвижными поясами.

Рифейский этап. Временной интервал $1650 \pm 50 - 650 \pm 20$ млн. лет. Территория Калужской области испытала неоднократную тектоно-магматическую активизацию. Основными структурами этого этапа, находящими отражение в поверхности фундамента, являются: Воронежский кристаллический массив, занимающий южную часть области и соответствующий Воронежской антеклизе по осадочному чехлу, Малоярославецко-Тарусский свод, краевые части Подмосковного и Пачелмского рифтов и Западнодвинский подвижный пояс, относящиеся к южному крылу Московской синеклизы по осадочному чехлу.

Кольцевые морфоструктуры. В настоящее время [8] на территории Калужской области выделяется 15 кольцевых (концентрических) морфоструктур, представляющих значительный интерес в свете задач настоящего проекта: Юхновская, Кондровская, Калужская, Дугнинская, Барятинско-Середейская, Ульяновская, Ильинская, Тёмкинская, Григоровская, Обнинская, Замшьевская, Бетлицкая, Бабынинская, Козельская и Брянская. Структурно-тектоническая позиция всех структур близка: все они располагаются в зонах палеозойской тектоно-магматической активизации, большинство из которых заложились на протерозойских подвижных поясах и зонах активизации.

Кольцевые структуры могут представлять собой зоны наиболее энергичного энергопереноса из глубоких недр Земли, т. е. представляют особый интерес с точки зрения петротермальной энергетики.

Результаты магнитотеллурических (МТ) исследований

В конце 1990-х гг., в ходе учебных практик студентов МГУ в Калужской области, на территории Барятинского района на глубине порядка 15 км была обнаружена аномалия повышенной электропроводности в консолидированной земной коре (рис. 1) [9]. Отметим, что здесь же наблюдается интенсивная Барятинская магнитная аномалия, связанная с железистыми кварцитами с повышенной магнитной проницаемостью, вскрытыми бурением в верхней части кристаллического фундамента.

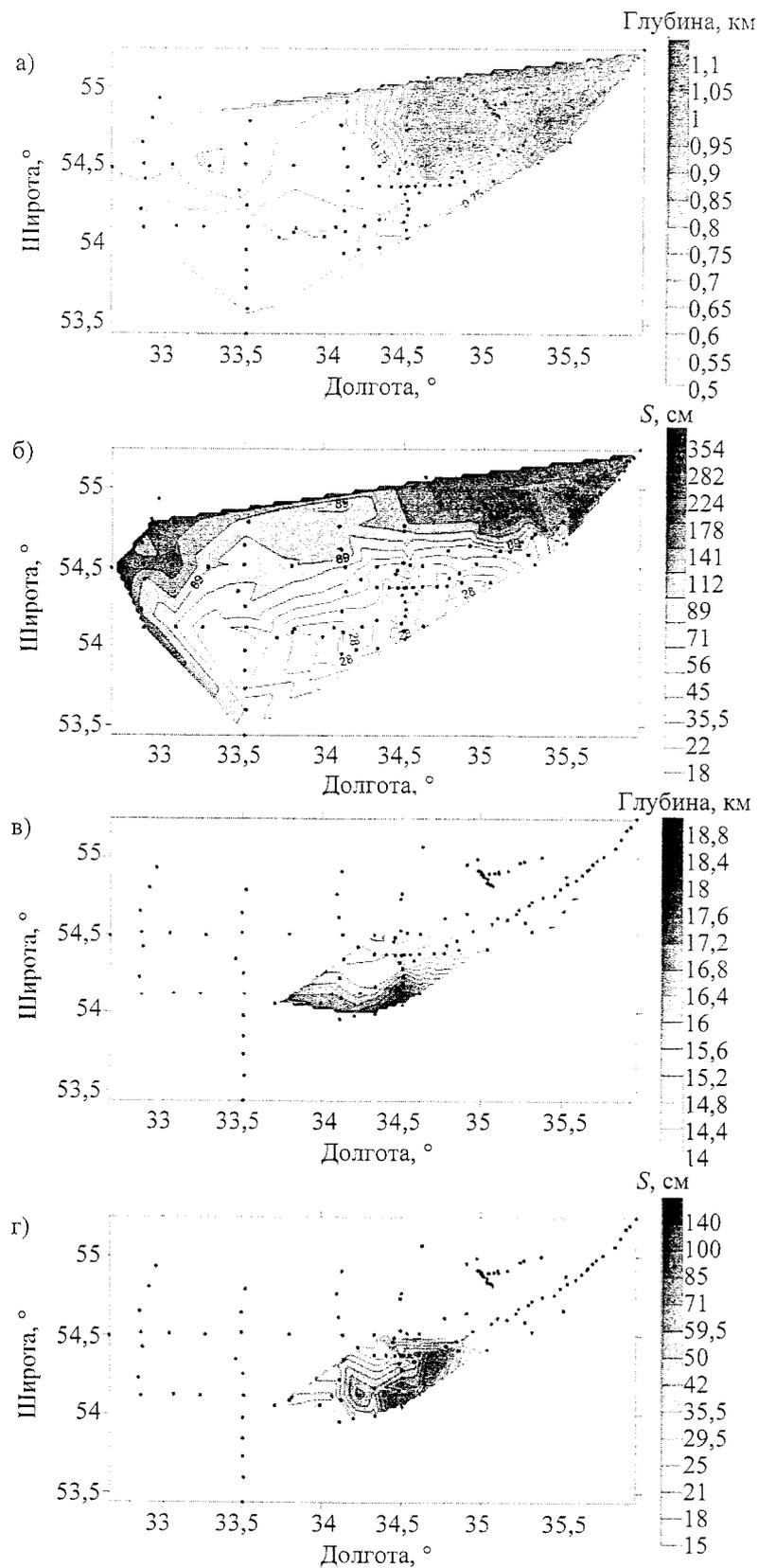


Рис. 1. Карты, построенные в результате интерпретации МТ-данных (запад Калужской и восток Смоленской областей): а) глубина до кристаллического фундамента (км), б) суммарная продольная проводимость осадочного чехла (см), в) глубина до корового проводящего слоя (км), г) его суммарная продольная проводимость (см). Чёрные точки – пункты МТ-зондирований

Южнее, на Украине, известна Кировоградская аномалия электропроводности, начинающаяся почти у Чёрного моря и протягивающаяся на север в направлении Калужской области. На этом основании были начаты МТ-исследования в зоне между Бярянтинской и Кировоградской аномалиями коровой электропроводности (в Калужской и Брянской областях и на территории Украины). По предварительным результатам этих работ можно говорить о единой протяжённой Кировоградско-Бярянтинской аномалии, хотя и обладающей сложной структурой. В этой аномальной зоне можно предполагать повышенный глубинный энергомассоперенос и соответственно относительно более высокие глубинные температуры.

Летом 2011 г. в рамках проекта выполнены 14 МТ-зондирований в районе Юхновской кольцевой структуры (Юхновский и Износковский районы Калужской области). Зондирования выполнялись с аппаратурой MTU-5 (производства Phoenix Geophysics Ltd), наблюдения велись в течение ночи. Для подавления промышленных помех проводилась синхронная обработка записей, полученных в рядовой точке и на базе МГУ в д. Александровке. Диапазон периодов измеренных колебаний поля составил примерно от 0003 до 1000 секунд.

В результате этих работ коровые аномалии электропроводности выделить не удалось, но это может объясняться увеличением мощности и проводимости осадочного чехла и ростом промышленных помех по мере приближения к центру Московской синеклизы и к Москве, а также ограниченным диапазоном периодов измеренных колебаний поля.

По-видимому, единственной возможностью ответить на вопрос о наличии коровой аномалии в районе Юхновской структуры остаётся глубинное МТ-зондирование с привлечением аппаратуры LEMI (производства ЛЦ ИКИ НАНУ). Опробование этой технологии также велось летом 2011 г. на базе МГУ в д. Александровке, где была начата непрерывная запись низкочастотных вариаций МТ-поля с помощью станций LEMI.

Палеомагнитные и петрофизические исследования

По данным палеомагнитных исследований ВЕП, выполненных соавтором статьи Н.В. Лубниной [10], сделан ряд выводов о ротационной тектонической эволюции ряда крупных блоков ВЕП (Карельского, Волго-Сарматского и др.), выявлены вращения, смещения, разворачивания, перемещения ряда блоков в разных интервалах геологической истории (2,74–2,72; 1,77; 1,45–1,38; 1,27–1,103 млрд. лет назад и более молодых). Геодинамика дрейфа континентов и ротационных движений блоков может вызвать на контактах массозенергоперенос из мантии. Поэтому дальнейшее картографирование подобных контактов крайне необходимо для региональной петротермальной геофизики.

Анализ физических свойств и, прежде всего, электропроводности керна скважин помогает интерпретации данных каротажа скважин и оценке продольной проводимости осадочного чехла S (сумма отношений мощностей однородных литологических толщ осадочного чехла к их удельным электрическим сопротивлениям). Этот параметр оказался очень важным для выделения проводящих слоёв в кристаллическом фундаменте при $S < 50$ см. При высоких $S > 100$ см аномалии в фундаменте по данным МТ-зондирования не прослеживаются.

Построение термотомографических моделей

Наиболее практически важным направлением исследований по проекту является объяснение природы выявленных геолого-геофизических аномалий Калужской области с точки зрения теплового режима верхней части земной коры. Оно связано

с построением термотомографической модели (объёмного трёхмерного изображения теплового поля верхней части земной коры [11]) Калужской области.

Метод заключается в нахождении глубинных температур и плотности теплового потока на различных глубинах в координатах XYZ. Для реальных геологических объектов подразумевается построение температурного распределения в зависимости от широты, долготы и глубины.

Для оценки температур на глубинах, не достигнутых бурением, а также глубины нахождения характерных температурных границ в литосфере была разработана методика 2D- и 3D-моделирования нестационарного теплового поля [12]. Теплофизическая среда, т. е. конфигурация контрастных теплофизических слоёв и значения тепло- и температуропроводностей, задавались на основе соответствующей оцифровки выделенных по сейсмическим и другим геолого-геофизическим данным структурных комплексов вдоль геологических профилей. Расчёт велся по программе проекта "TERMGRAF", разработанной М.Д. Хуторским.

Расчёт глубинных температур проводился в неблагоприятной для магнитотеллурики части Калужской области, вдоль профилей AA и BB, построенных С.П. Бобровым. Они пересекают территорию Калужской области с юго-запада на северо-восток и с северо-запада на юго-восток. Кроме того, М.Д. Хуторским были промоделированы ещё два профиля в центре двух основных профилей. Координаты начала и конца профилей, длина профилей и расчётные глубины приведены в таблице.

Таблица. Географическая характеристика модельных профилей

Названия профилей	Координаты, °		Длина, км	Глубина, км
	Начало	Конец		
AA	54,67 С.Ш. 35,21 В.Д.	55,33 С.Ш. 35,90 В.Д.	90	4
BB	55,01 С.Ш. 35,00 В.Д.	54,70 С.Ш. 36,00 В.Д.	76	4
11	55,08 С.Ш. 35,00 В.Д.	54,35 С.Ш. 36,97 В.Д.	148	4
22	54,10 С.Ш. 35,00 В.Д.	54,86 С.Ш. 37,00 В.Д.	160	4

При расчётах были учтены структурно-теплофизические неоднородности разреза в пределах данных профилей, а также структура нижней части осадочного чехла и поверхности фундамента (до глубины 4 км) по картографической информации о глубине его залегания на территории Калужской и смежных областей (С.П. Бобров). Полученные температурные профили приведены на рис. 2.

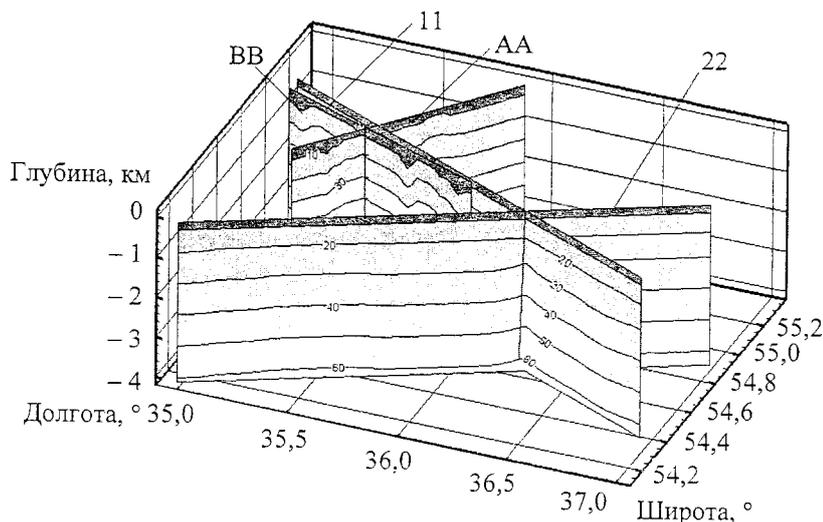


Рис. 2. Двухмерные температурные профили северо-запада Калужской области

Для проведения объёмной интерполяции и получения 3D-модели распределения температур двумерные расчёты вдоль профилей были размещены в трёхмерном плотте в соответствии с их расположением. При такой методике появилась возможность оценки точности температурных расчётов, т. к. в створе их пересечения значения температур должны совпадать. Построенная трёхмерная термотомографическая модель северо-запада Калужской области приведена на рис. 3.

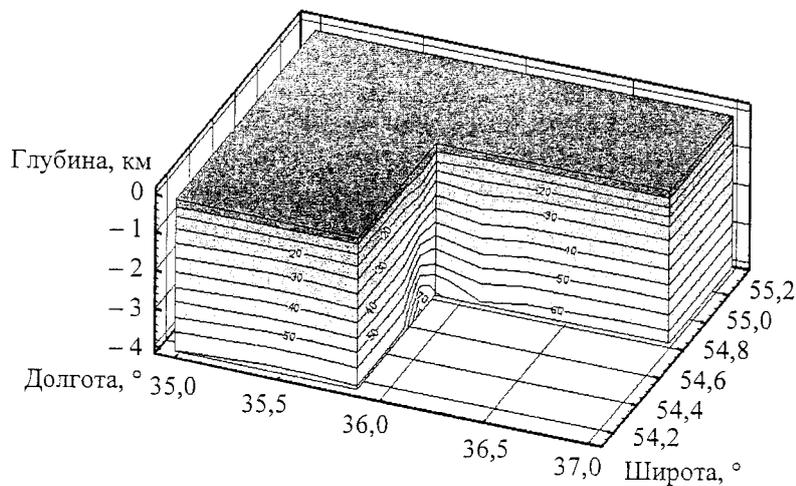


Рис. 3. Трёхмерная термотомографическая модель северо-запада Калужской области

По данным расчётов, тепловое поле в Калужской области спокойно. Изолинии (изоповерхности) температур почти параллельны с возрастанием температур с глубиной. Однако на площади с координатами 56,6°–54,8° С.Ш. 35,9°–36,0° В.Д. наблюдается небольшая положительная аномалия температур с амплитудой +15 °С на глубине 4 км, которая, по-видимому, связана с мульдообразной впадиной на поверхности фундамента западнее Калуги. Максимальные температуры, которые достигаются на глубине 4 км, составляют 60 °С. Этого, естественно, недостаточно для использования глубинного тепла для петротермальной геозенергетики. Но мы и не ожидали в таком тектонически стабильном регионе, как Калужская область, встретить более высокие температуры на таких глубинах. Практический отбор глубинного тепла возможен здесь при глубине скважин 8–9 км. Наличие данных о температурах на таких глубинах требует дополнительных геолого-геофизических сведений.

Заключение

Анализ совокупности геолого-геофизических данных позволяет рассматривать зону приподнятого (42–40 км и выше) залегания поверхности Мохо, охватывающую северную часть Калужской области, в качестве возможной зоны (области) так называемой возбуждённой мантии. Она характеризуется гетерогенностью скоростных и плотностных параметров, пониженными значениями параметра V_p/V_s (отношения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн) в земной коре, присутствием локализованных областей повышенной электропроводности и, следовательно, зоной, обеспечивающей функционирование рудообразующих, "тепловых" и "теплоэнергетических" систем. Кольцевые вулканотектонические структуры, расположенные в зоне возбуждённой мантии, несомненно, могут быть энергетическими центрами наиболее энергичного энергопереноса из глубоких

недр Земли. В них можно ожидать "теплоэнергетические котлы" с относительно неглубоким (значительно меньше 10 км от земной поверхности) положением массивов пород с температурой 250–300 °С, что, естественно, даст значительный экономический эффект, а главное – рентабельность использования петротермального источника энергии. Впрочем, до 2011 г. "теплоэнергетических котлов" на глубинах порядка 5 км в Калужской области не обнаружено. Следует продолжать более детальные МТ-исследования с низкочастотной аппаратурой.

Литература

1. *Гнатусь Н.А., Хуторской М.Д., Хмелевской В.К.* Петротермальная геоэнергетика и геофизика // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2011. № 3. С. 3–9.
2. *Бембель Р.М., Бембель С.Р., Мегеря В.М.* Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Вектор Бук, 2003. С. 662–670.
3. Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды, нефть и газ: углеводороды и жизнь: Материалы Всероссийской конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина. М.: ГЕОС, 2010. 712 с.
4. *Мегеря В.М.* Поиски и разведка залежей углеводородов, контролируемых геосилитонной дегазацией Земли. М.: Локус Станди, 2009. 256 с.
5. *Петров В.Г.* Геологическое строение и полезные ископаемые Калужской области. Калуга, 2003. 440 с.
6. *Бобров С.П.* Тектоника и минерагения Калужской области и прилегающих к ней территорий. Калуга, 2006. 336 с.
7. *Романовская М.А., Никитин Р.М.* Геологическое строение и гидрогеологические условия Калужской области в районе д. Александровка. М.: МГУ, 2007. 53 с.
8. *Бобров С.П.* Геологический атлас Калужской области. Калуга, 2007. 72 с.
9. *Александрова Е.Д., Варенцов Ив.М., Верещагина М.И., Куликов В.Д., Пушкарёв П.Ю., Соколова Е.Ю., Шустов Н.Л., Хмелевской В.К., Яковлев А.Г.* Электромагнитные зондирования осадочного чехла и консолидированной земной коры в зоне перехода от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе: проблемы и перспективы // Физика Земли. 2010. № 8. С. 62–71.
10. *Лубнина Н.В.* Восточно-Европейский кратон в мезопротерозое: новые ключевые палеомагнитные полюсы // Доклады Российской академии наук. 2009. Т. 428. № 2. С. 252–257.
11. *Хуторской М.Д., Вискунова К.Г., Подгорных Л.В., Ахмедзянов В.Р.* Геотемпературная модель Баренцевоморской плиты: исследования вдоль геотравверсов // Геотектоника. 2008. № 2. С. 36–54.
12. *Хуторской М.Д., Тепеленя Е.А., Цыбуля Л.А., Урбен Г.И.* Тепловой поток в солянокупольных бассейнах Евразии – сравнительный анализ // Геотектоника. 2010. № 4. С. 3–19.