

На правах рукописи

Заведий Тарас Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ
И МЕТОДИКИ ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРИ МОНИТОРИНГЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
(на примере полигона захоронения отходов
Сибирского химического комбината)**

Специальность 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
профессор **Ерофеев Леонид Яковлевич**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, профессор **Сальников Владимир Николаевич**
кандидат геолого-минералогических наук,
Мельник Игорь Анатольевич

Ведущая организация: **ОАО "Томскгеомониторинг", г. Томск**

Защита состоится «23» декабря 2010 г. в 11⁰⁰ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.12 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2, строение 5, (20 корп. ТПУ), ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «НИ ТПУ» (634050, г. Томск, ул. Белинского, д. 55).

Автореферат разослан « » ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета, доктор
геолого-минералогических наук

А. А. Поцелуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В процессе эксплуатации крупнейшего в России промышленного полигона подземного захоронения жидких радиоактивных отходов (ЖРО), расположенного на территории предприятия ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) – ОАО «СХК» (Сибирский химический комбинат, Томская область), начиная с 1958 г. и по настоящее время, накоплен большой объем уникальных результатов скважинных геолого-геофизических исследований. Обобщение, комплексная обработка и интерпретация полученной на СХК геолого-геофизической информации позволяют выработать новые методики и подходы в изучении пространственно-временного распределения естественных и техногенных температурных полей в геологической среде, и, тем самым, повысить эффективность геотехнологического мониторинга.

Цель работы

Разработка теоретических положений и практических рекомендаций по совершенствованию методики гидрогеотермических исследований на основе геолого-математического моделирования.

Задачи исследований:

- определить, на основе обобщения и анализа результатов гидрогеотермических и других геофизических методов исследований скважин, факторы естественного и техногенного происхождения, искажающие фоновое геотемпературное поле;
- разработать методику расчета аномальных температурных полей, возникающих в процессе подземного захоронения ЖРО, с последующим решением обратной задачи по определению пространственной конфигурации тепловых источников;
- разработать методические рекомендации, направленные на повышение эффективности интерпретации аномалий геотемпературных полей.

Теоретическая и методологическая база исследования.

При выполнении работы автор опирался на теоретические подходы к математическому моделированию нестационарных температурных полей и температурных фазовых переходов, изложенные в трудах: Рубинштейна Л. И., Фролова Н. М., Череманского Г. А., Чекалюка Э. Б., Тихонова А. Н., Самарского А. А., Ершова Э. Д. и др. В рассмотрении вопросов, связанных с петрофизическими свойствами пород, автор использовал методы и зависимости, изложенные в работах: Дортман Н. Б., Дахнова В. Н., Вендельштейна Б. Ю., Добрынина В. М. Кожевникова Д. А., Кобрановой В. Н., Ерофеева Л. Я., Вахромеева Г. С. и др.

Фактическим материалом для написания работы послужили результаты геофизических исследований скважин, расположенных в преде-

лах полигона подземного захоронения ЖРО СХК и его горного отвода недр, за период 1997 – 2010 г.г.; результаты интерпретации данных геофизических исследований и описания керна, выполненные при сооружении скважин контрольной сети полигона. Использовались результаты интерпретации данных опытно-фильтрационных работ (ОФР) 1961 – 1963 г.г., выполненных при гидрогеологических изысканиях на этапе разведки места размещения полигона подземного захоронения ЖРО.

Методы исследования.

Основным методом исследования в диссертации является – метод скважинной термометрии (термокаротаж), выполняемый в скважинах с ненарушенным температурным полем. Также в работе использованы данные геофизических исследований скважин, гидрогеологических и гидрогеохимических исследований.

Научная новизна работы.

Впервые проведено обобщение и комплексная интерпретация результатов гидрогеотермических измерений, выполненных в краевой части осадочного чехла Западно-Сибирского артезианского бассейна в пределах области разгрузки регионального потока фильтрации, на базе новых подходов по изучению параметров пространственно-временного распределения естественных и техногенных аномальных геотемпературных полей, включающих в себя следующее:

- теоретическую разработку методики учета и определение совокупности искажающих факторов естественного геотемпературного поля и его пространственных производных; разработку способов повышения точности интерпретации результатов скважинных гидрогеотермических измерений и определения значений высших пространственных производных геотемпературного поля в осадочном разрезе с учетом искажающего воздействия естественных литологических, палеоклиматических, гидрогеологических и ландшафтно-климатических температурных факторов;
- постановку и решение обратной задачи теплопроводности применительно к определению параметров пространственной конфигурации самораспадающегося сорбируемого тепловыделяющего компонента, внедренного в поровое пространство геологической среды по наблюдаемой динамике аномального температурного поля.

Достоверность полученных результатов основана на использовании данных натурного моделирования, общепринятых аналитических и численных решений дифференциальных уравнений математической физики для расчета пространственно-временного распределения аномальных температурных полей.

Практическая значимость работы.

- В процессе исследований разработаны и практически опробованы на примере полигона подземного захоронения ЖРО СХК новые ме-

тоды геолого-геофизической интерпретации гидрогеотермических данных, полученных в результате непрерывного геотехнологического мониторинга геологической среды;

- разработана методика, направленная на определение параметров пространственной конфигурации тепловыделяющих радионуклидов вокруг нагнетательных скважин полигона, что позволяет обосновывать радиационную безопасность персонала при планировании и организации бурения новых скважин в интервалы насыщения фильтратом ЖРО;
- предложенные в настоящей работе методы расчета аномальных температурных полей используются для прогнозных и эпигнозных расчетов аномального теплового разогрева геологической среды в рамках регламентного обеспечения безопасности процесса подземного захоронения жидких технологических радиоактивных отходов радиохимического завода (РХЗ) Сибирского химического комбината;
- результаты исследований могут быть также востребованы при проектировании, сооружении и эксплуатации новых полигонов подземного захоронения промышленных стоков вблизи экологически опасных предприятий различного отраслевого назначения.

На защиту выносятся:

- методика учета температурных возмущений от комплекса искажающих факторов естественного геотемпературного поля в верхней части разреза осадочных бассейнов;
- рекомендации по комплексированию методов: геофизических исследований скважин (ГИС), гидрогеологии, гидрогеохимии и климатологии, необходимых для информационного сопровождения гидрогеотермических измерений в рамках мониторинга геологической среды;
- результаты решения обратной задачи теплопроводности для определения по наблюдаемой динамике параметров аномального температурного поля пространственной конфигурации самораспадающегося сорбируемого тепловыделяющего компонента, внедренного в проницаемое пространство геологической среды.

Личный вклад автора.

На всех этапах выполнения научных исследований, включенных в диссертацию, автор являлся исполнителем теоретических и экспериментальных исследований и принимал непосредственное участие при получении части исходных геолого-геофизических данных и их обработке.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих симпозиумах и конференциях: на научно-практической конференции молодых специалистов и аспирантов «Молодежь ЯТЦ: Наука и производство», (г. Северск, 2007 г.); на XII-ом международном научном симпозиуме имени

академика М. А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2008 г.); на отраслевой научно-практической конференции «Молодежь ЯТЦ: Наука, производство, экологическая безопасность», (г. Северск, 2008 г.); на 7-ой международной научно-технической конференции «Современные технологии освоения минеральных ресурсов», (г. Красноярск, 2009 г.); на отраслевой научно-практической конференции молодых специалистов и аспирантов «Молодежь ЯТЦ: наука, производство, экологическая безопасность» (г. Железногорск, Красноярский край, 2009 г.).

Публикации.

Основные материалы работы опубликованы в виде двух статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, а также в 6 тезисах докладов на международных симпозиумах и научно-практических конференциях.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из: введения, 4 глав, заключения, списка цитируемой литературы. Материал диссертации изложен на 146 страницах, включая 7 таблиц, содержит 31 рисунок и список литературных источников из 78 наименований.

Благодарности.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю – доктору геолого-минералогических наук, профессору Л. Я. Ерофееву за чуткое руководство и внимательное отношение в период работы над диссертацией.

Также автор выражает искреннюю благодарность руководству и коллективу лаборатории геотехнологического мониторинга Сибирского химического комбината за ценные советы, предоставленные материалы и оборудование, а также за неоценимую помощь в написании диссертации: А. А. Зубкову, В. Е. Раззамазову, В. А. Сухорукову, В. П. Иваненко, Н. Т. Сухоруковой, О. В. Макаровой, В. В. Данилову, А. В. Цыгеру, В. Ф. Аникину, А. И. Зыкову, Е. А. Редькину и др.

Автор благодарит руководство и производственный персонал цеха 4 радиохимического завода СХК, а также коллектив филиала Гидрогеологической экспедиции №25 ФГУГП «Гидроспецгеология» за их добросовестный повседневный труд, связанный с задачами эксплуатации, создания и расширения скважинной сети полигона подземного захоронения ЖРО СХК, благодаря чему были получены уникальные геолого-геофизические данные, изложенные в диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна работы, перечислены выносимые на защиту положения, показана практическая значимость работы.

В первой главе представлено описание изучаемого района. Приведены его климатологические характеристики по опорной метеостанции, в частности, рассмотрены важнейшие факторы, непосредственно формирующие термический режим в верхней части изучаемого разреза: средняя годовая температура приземного воздуха, средняя годовая температура грунтов по стандартному ряду глубин, сумма и годовой ход выпадения осадков, характеристики залегания снежного покрова в зимний период. Приведенные в этой главе метеопараметры рассматриваются не как постоянные величины, а как динамически изменяющиеся во времени, о чем свидетельствуют графики трендов многолетних изменений температуры, осадков и других климатологических данных. Также приведено геологическое и гидрогеологическое строение района расположения полигона подземного захоронения ЖРО и методы исследований, применяемые в рамках геотехнологического мониторинга.

Во второй главе приведены основные петрофизические зависимости и региональные геотермические параметры, необходимые для интерпретации результатов гидрогеотермических исследований: теплофизические свойства пород, общая пористость, проницаемость, представлена оценка значения регионального теплового потока для исследуемой территории.

В описании аналитической модели теплофизических свойств осадочных пород учтено уменьшение общей пористости с глубиной, а также влияние фазового перехода на теплоемкость и теплопроводность,

$$\lambda(z, T) = \begin{cases} \lambda_w \cdot f(\lambda_s / \lambda_w, m(z)), & \text{при } T > T_L \\ \lambda_l \cdot f(\lambda_s / \lambda_l, m(z)) + \lambda_w \cdot f(\lambda_s / \lambda_w, m(z)) - \lambda_l \cdot f(\lambda_s / \lambda_l, m(z)) / (T_L - T_S), & \text{при } T_S \leq T \leq T_L \\ \lambda_l \cdot f(\lambda_s / \lambda_l, m(z)), & \text{при } T < T_S \end{cases} \quad (1)$$

где λ_l – теплопроводность льда, Вт/(м·К); λ_w – теплопроводность воды, Вт/(м·К); λ_s – теплопроводность минерального скелета осадочной породы, Вт/(м·К); T_L – температура начала фазового перехода заморзания-оттаивания, °С; T_S – температура завершения фазового перехода, °С. Функция расчета теплопроводности двухкомпонентной смеси для изометричных сферических включений имеет вид

$$f(n, m) = \frac{3n + 2m(1 - n)}{3 - m(1 - n)},$$

где n – отношение теплопроводности минерального скелета породы к теплопроводности порового пространства. m – общая пористость породы, ее зависимость от глубины $m(z)$, принята равной

$$m(z) = m_0 e^{-\frac{z}{L_m}}.$$

Фазовый переход в простейшем варианте моделируется резким увеличением объемной теплоемкости в конечном интервале температур T_S и

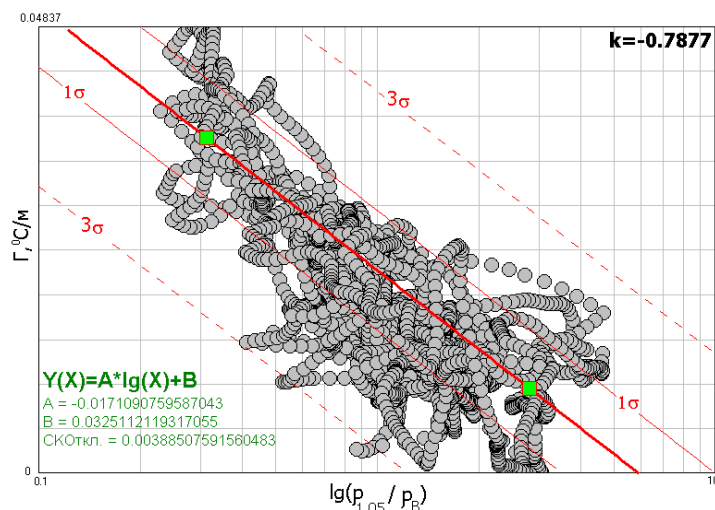


Рис.2. Корреляция значений вертикального температурного градиента Γ и десятичного логарифма отношения кажущегося удельного электрического сопротивления ($Y_{ЭС}$) пород и пластовой воды (контрольная геофизическая скважина А-40, интервал глубин 190–460 м).

Этот результат дает возможность обоснованного применения данных геофизических исследований скважин при изучении вертикального профиля значений теплопроводности в интервалах разреза, где конвективные искажения теплового потока незначительны.

На основании результатов анализа гранулометрического состава осадочных пород, полученных по скважинам полигона подземного захоронения ЖРО, предложен, применительно к исследуемой территории, метод определения проницаемости пород палеоцен-верхнемеловых горизонтов, основанный на пересчете результатов бокового электрического зондирования в значения проницаемости. Выявлена наиболее сильная корреляционная связь с расчетными значениями проницаемости по метровым и двухметровым зондам.

При анализе региональной геотермической ситуации использованы значения из мировой базы данных теплового потока Земли, содержащей только по территории нашей страны более 4000 измерений.

В третьей главе рассмотрено влияние совокупности основных искажающих факторов на значения вертикальных пространственных производных геотемпературного поля. Особое внимание уделено изучению искажений второй производной температурного поля в вертикальном направлении. В главе указано на принципиальную возможность определения с высокой точностью интервально осредненных значений второй производной геотемпературного поля, вычисленных путем трендовой аппроксимации по каротажным термограммам, регистрация которых выполнена в цифровом виде.

На основании решений одномерных дифференциальных уравнений теплопроводности количественно определено искажающее влияние на геотемпературное поле и его производные следующих факторов: теплоге-

нерации в разрезе за счет распада естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), изменения теплопроводности с глубиной за счет уменьшения общей пористости, температурного влияния осадконакопления, температурного влияния планетарного похолодания с эоцена и по настоящее время.

Особенно подробно рассмотрено искажающее температурное влияние четвертичных ледниковых циклов. Приведены приближенные аналитические решения промерзания и оттаивания криогенной толщи, а также выполнен численный расчет аномальных искажений геотемпературного поля от периодических циклов оледенений. Численное решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности с учетом (1) и (2)

$$C(z, T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

с периодическим граничным условием (рис.3, б) на поверхности позволило определить степень искажения геотемпературного поля после деградации плейстоценовой криогенной толщи в исследуемом районе.

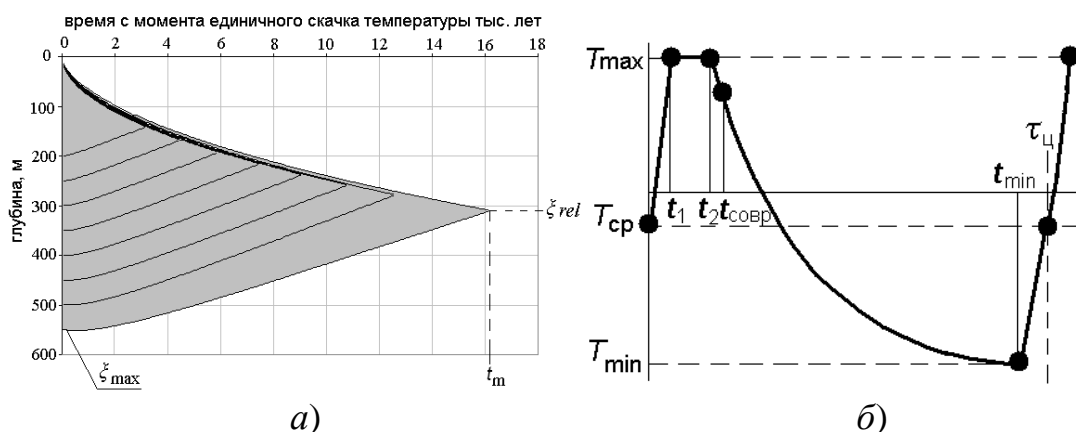


Рис.3. Результаты расчета оттаивания криогенной толщи и схема задания граничных условий на поверхности: *а* – расчет продолжительности деградации криогенной толщи (серым цветом показаны мерзлые породы); *б* – схема периодического граничного условия динамики приповерхностной палеотемпературы для одного цикла оледенения.

Наряду с палеоклиматическим искажением геотемпературного поля, сформулировано понятие палеогеокриологического искажения и выделены важнейшие параметры, характеризующие его степень (рис.3, *а*): максимальная мощность промерзания пород ξ_{max} , глубина положение последних оттаявших пород в разрезе ξ_{rel} и продолжительность деградации криогенной толщи t_m . Ниже, на рис. 4, представлены результаты расчета искажений в осадочном разрезе геотемпературного поля и его пространственных производных от последнего цикла оледенения.

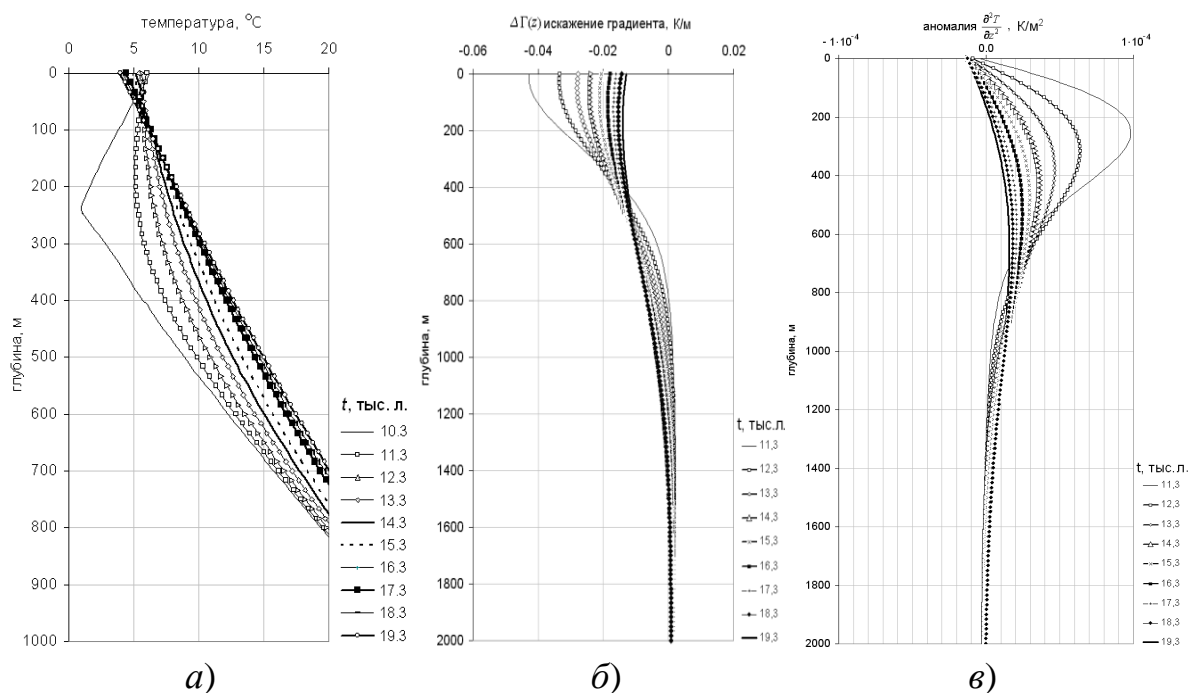


Рис. 4. Результаты расчета искажений геотемпературного поля и его пространственных производных: *а* – температурное поле, *б* – вертикальный температурный градиент, *в* – вторая производная геотемпературного поля по вертикали.

На основании полученных расчетных данных высказаны рекомендации по комплексированию гидрогеотермических измерений с результатами изотопных гидрогеохимических исследований, что позволит инструментально определять и уточнять методами геохимии параметры, определяющие интенсивность современного палеогеокриологического искажения в разрезе для более точного расчета геотермических поправок.

Не оставлены без внимания и современные глобальные климатические изменения. Определены значения глубин, в пределах которых этот искажающий температурный фактор оказывает заметное влияние на геотемпературное поле и его пространственные производные.

Также, в главе рассматриваются стационарные температурные поля, существующие под крупными естественными или антропогенными неоднородностями ландшафта, формирующими пространственные аномалии приповерхностной средней годовой температуры. Показана однозначная связь характерного размера ландшафтного нарушения с глубиной, до которой прослеживается аномальное влияние на геотемпературное поле и его пространственные производные.

Наряду с ландшафтными неоднородностями, особое влияние на геотемпературный режим изучаемого разреза оказывают снежный покров и неоднородности снегонакопления, обусловленные геоморфологическими факторами. В главе по простым зависимостям определено значение дифференциального коэффициента утепляющего эффекта снежного покрова

и, в связи с этим, высказаны рекомендации по комплексированию гидро-геотермических исследований с площадной снегомерной съемкой.

Важной частью в главе является описание и вывод аналитической зависимости, связывающей величину второй производной геотемпературного поля и среднюю скорость восходящей «+» (нисходящей «-») фильтрации v_ϕ в песчано-глинистом разрезе с мощностью h и перепадом температур между кровлей и подошвой ΔT :

$$v_\phi = -\text{sign}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \frac{\lambda}{hC_w} \left(\sqrt{1 + \frac{2h^2}{\Delta T} \left| \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right|} - 1 \right).$$

Приведены впервые выполненные на исследуемой площади результаты многолетних скважинных измерений второй производной геотемпературного поля в интервале зоны замедленного водообмена (палеоцен-верхнемеловые отложения), показаны простые примеры интерпретации этих данных для решения задач из различных областей знаний: геологии, геофизики, палеоклиматологии, гидрогеологии.

Таблица 1. Результаты и погрешность измерения второй производной геотемпературного поля в интервале палеоцен-верхнемеловых отложений на исследуемой территории.

№	Скважина	$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, К/м ²	σ , К/м ²
1	П-16	$-4,02 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,774 \cdot 10^{-5}$
2	С-1	$-0,98 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,656 \cdot 10^{-5}$
3	С-71	$+1,60 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,892 \cdot 10^{-5}$
4	С-72	$-0,04 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,188 \cdot 10^{-5}$
5	СН-93	$+0,68 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,620 \cdot 10^{-5}$
6	С-16	$-0,36 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,678 \cdot 10^{-5}$
7	С-17	$+8,06 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,718 \cdot 10^{-5}$
8	СН-106	$-1,70 \cdot 10^{-5}$	
9	№55	$+2,44 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,236 \cdot 10^{-5}$
10	СН-101	$+3,50 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,726 \cdot 10^{-5}$
11	Г-27	$-2,40 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,410 \cdot 10^{-5}$
12	СН-98	$-2,60 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,546 \cdot 10^{-5}$
13	Г-21	$+2,36 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,354 \cdot 10^{-5}$
14	С-10	$+1,54 \cdot 10^{-5}$	
15	№54	$-2,20 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,752 \cdot 10^{-5}$
16	С-6	$+1,60 \cdot 10^{-5}$	
17	А-40	$-0,56 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,386 \cdot 10^{-5}$
18	А-42	$-2,42 \cdot 10^{-5}$	
19	А-36	$+0,22 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1,102 \cdot 10^{-5}$
20	А-34	$-1,92 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,306 \cdot 10^{-5}$

Скважины, по которым получены данные, представленные в таблице 1, для минимизации возможных внутрискважинных искажений температурного поля, отобраны по следующему критерию: либо они находятся на границе полигона подземного захоронения в фоновых геотемпературных условиях, являются неперфорированными для полного исключения искажающего влияния внутрифильтрового перетока на регистрируемую термограмму и максимально удалены от нагнетательных скважин, либо находятся за границей полигона на участках, где гидрогеодинамическое поле является невозмущенным, и искажений термограмм вследствие внутрифильтрового перетока, выходящих за пределы погрешности термометра, не наблюдается (в табл. 1 значение σ определялось при числе термограмм три и более).

По результатам из таблицы 1, в качестве иллюстративного примера применения результатов гидрогеотермических измерений, дана оценка верхнего возможного предела значения коэффициента вертикальной фильтрации, осредненного по всему интервалу исследуемой песчано-глинистой толщ палеоцен-верхнемеловых отложений.

В четвертой главе изложены вопросы, посвященные производственной тематике – обеспечению экологической безопасности процессов промышленного захоронения технологических среднеактивных ЖРО. Предложено решение обратной геофизической задачи – определение параметров пространственной конфигурации самораспадающегося сорбируемого радионуклидного тепловыделяющего компонента, внедренного в поровое пространство геологической среды. Выбран ряд упрощающих допущений при разработке математической модели: однопластовое приближение, радиальный фильтрационно-изотропный проницаемый пласт-коллектор постоянной мощности H (рис.5,а), перекрытый водоупорами (рис.5,б); приближение непрерывного нагнетания растворов ЖРО с расходом q за весь период эксплуатации t_e нагнетательной скважины; простейший учет физико-химических процессов взаимодействия радионуклидов с минеральным скелетом осадочных пород выполнен через безразмерный коэффициент межфазного распределения k_d и рассчитываемый по эффективной пористости m^* фактор задержки R (рис.5,в); путем расчета средних значений теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности λ , C_v , a , приближенно учтена зависимость теплофизических свойств пород от температуры, рассмотрена анизотропия теплопроводности: λ_r и λ_z (в радиальном и вертикальном направлениях соответственно).

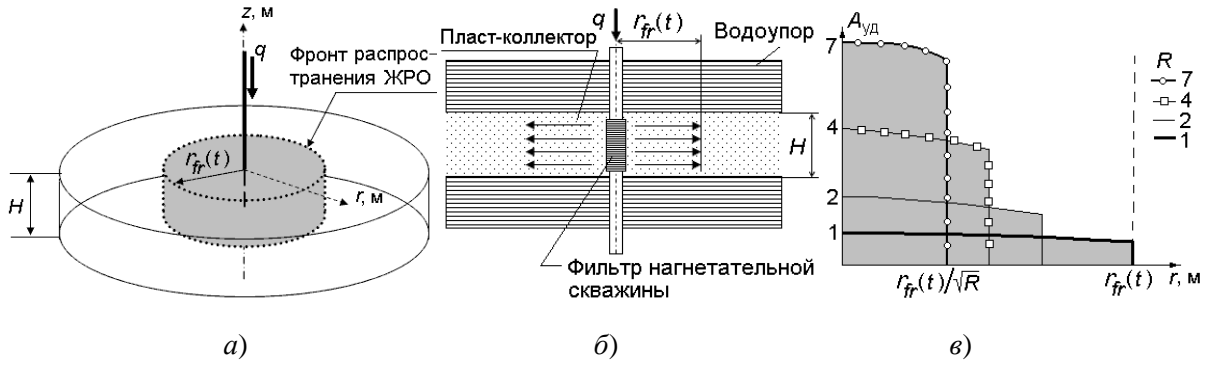


Рис. 5. Схемы упрощений: строение пласта-коллектора и сорбция, *а* – приближение поршневого вытеснения цилиндрического объема; *б* – вертикальный разрез пласта-коллектора; *в* – упрощенное приближение физико-химических процессов.

На рис.5 $r_{fr}(t)$ – положение границы фронта вытеснения пластовых вод фильтратом ЖРО в момент времени t , м, рассчитывается по формуле вытеснения объема при $t < t_e$, $r_{fr}(t) = \sqrt{\frac{qt}{\pi m^* H}}$, при $t > t_e$, $r_{fr}(t) = \sqrt{\frac{qt_e}{\pi m^* H}}$.

В главе рассмотрены математическая модель и результаты расчета аномального температурного поля в геологической среде, обусловленного суперпозицией от конвективного теплового загрязнения геологической среды растворами ЖРО и радиогенным разогревом пласта-коллектора, вмещающего тепловыделяющие радионуклидные компоненты, входящие в состав удаляемых ЖРО на полигоне подземного захоронения.

Конвективная составляющая $T_K(r, z, t)$ аномального температурного поля рассчитана из приближенного решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности:

Конвективная составляющая $T_K(r, z, t)$ аномального температурного поля рассчитана из приближенного решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности:

$$\begin{cases} C_v \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \lambda_z \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - C_w V_\phi(r) m^* \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r}, & \text{при } |z| \leq H/2; \\ C_v \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \lambda_z \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}, & \text{при } |z| > H/2; \end{cases} \quad (3)$$

Условия на границах пласта и водоупора $T_1(r, z, t)_{z=+H/2} = T_2(r, z, t)_{z=+H/2}$;

Начальные условия $T_1(r, z, t)_{t=0} = 0$, $T_2(r, z, t)_{t=0} = 0$;

Условие на бесконечности $T_1(r \rightarrow \infty, z < H, t) = 0$ и $T_2(r, z \rightarrow \infty, t) = 0$, $T_2(r \rightarrow \infty, z, t) = 0$;

Условие на скважине $T_1(0, |z| < H/2, t) = F(t)$, например, $F(t) = T_0$,

где C_w – теплоемкость нагнетаемой жидкости (раствор ЖРО), Дж/(м³·К); $V_\phi(r)$ – скорость фильтрации в радиальном направлении, м/с:

$$V_\phi(r) = \frac{q}{2\pi m^* H r}.$$

При $t < t_e$ решение (3), полученное автором, выглядит следующим образом:

$$\tilde{f}(\tilde{r}, \tilde{z}, \tilde{t}) = \frac{T_K(\tilde{r}, \tilde{z}, \tilde{t})}{T_0} = e^{-\sqrt{\text{Fo}_z} \frac{2\tilde{r}^2}{\sqrt{\pi(\tilde{t}-\tilde{r}^2)}}} \cdot \text{erfc}\left(\frac{(|\tilde{z}|-1/2) \cdot \chi(|\tilde{z}|-1/2)}{2\sqrt{\text{Fo}_z} \sqrt{\tilde{t}-\tilde{r}^2}}\right), \tilde{r}^2 \leq \tilde{t},$$

$\chi(x)$ – функция Хэвисайда. $\chi(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 1 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$, при $t \geq t_e$ решение (3) берется, как

остывающее температурное поле с начальным распределением температуры, отличным от 0

$$\frac{T_K(\tilde{r}, \tilde{z}, \tilde{t})}{T_0} = \frac{\pi}{4\text{Fo}_r \sqrt{\text{Fo}_z} \sqrt{\pi(\tilde{t}-1)}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(\tilde{z}-\tilde{\zeta})^2}{4\text{Fo}_z(\tilde{t}-1)}} d\tilde{\zeta} \int_0^1 e^{-\frac{(\tilde{r}^2+\tilde{\rho}^2)}{4\text{Fo}_r(\tilde{t}-1)}} I_0\left(\frac{2\tilde{r}\tilde{\rho}}{4\text{Fo}_r(\tilde{t}-1)}\right) \tilde{f}(\tilde{\rho}, \tilde{\zeta}, 1) \tilde{\rho} d\tilde{\rho},$$

где Fo_z, Fo_r – критерии Фурье для вертикального и радиального направлений процесса теплопереноса соответственно. Безразмерный радиус

$\tilde{r} = r/r_{\max}$, $r_{\max} = r_{fr}(t_e) = \sqrt{\frac{qt_e}{\pi m^* H}}$, безразмерная глубина $\tilde{z} = z/H$, безразмерное

время $\tilde{t} = t/t_e$. Вертикальный профиль безразмерной аномальной температуры конвективной составляющей представлен ниже на рис.6.

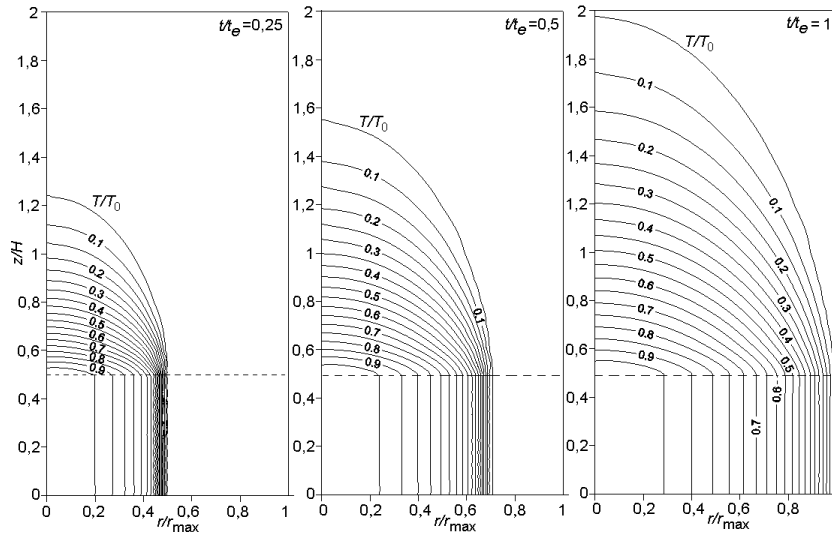


Рис.6. Вертикальный профиль безразмерного температурного поля для $T_K(r, z, t)$ при различных значениях времени $t/t_e \leq 1$.

Радиогенная составляющая $T_R(r, z, t)$ аномального температурного поля определена из решения системы двух дифференциальных уравнений теплопроводности

$$\begin{cases} C_v \frac{\partial T_R^I}{\partial t} = \lambda_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_R^I}{\partial r} \right) + \lambda_z \frac{\partial^2 T_R^I}{\partial z^2} - C_w V_\phi(r) m^* \cdot \frac{\partial T_R^I}{\partial r} + m^* \sum_{i=1}^P \gamma_i A_i R_i F_i(r, z, t), & t \leq t_e; \\ C_v \frac{\partial T_R^{II}}{\partial t} = \lambda_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_R^{II}}{\partial r} \right) + \lambda_z \frac{\partial^2 T_R^{II}}{\partial z^2} + m^* \sum_{i=1}^P \gamma_i A_i R_i F_i(r, z, t), & t > t_e; \end{cases} \quad (4)$$

Начальное условие $T_R^I(r, z, t)|_{t=0} = 0$; условия на бесконечности $T_R^I(r \rightarrow \infty, z, t) = 0$, $T_R^I(r, z \rightarrow \infty, t) = 0$; $T_R^{II}(r \rightarrow \infty, z, t) = 0$, $T_R^{II}(r, z \rightarrow \infty, t) = 0$; условие на

скважине $T_R^I(r=0, |z| < H/2, t) = 0$; условие затухания $T_R^{II}(r, z, t \rightarrow \infty) = 0$; условие сопряжения решений $T_R^I(r, z, t_e) = T_R^{II}(r, z, t_e)$.

где A_i – удельная активность i -го радионуклида, в составе нагнетаемых в пористый пласт ЖРО, Ки/м³; γ_i – средняя мощность энерговыделения i -го радионуклида на 1 Ки, Вт/Ки; R_i – фактор задержки i -го радионуклида; P – число радионуклидов в составе отходов, в работе рассматривается только один радионуклид – ¹³⁷Cs, поэтому $P=1$; $F_i(r, z, t)$ – безразмерная функция

для i -го радионуклида. Решение (4) записывается в следующем виде.

$$\frac{T_R(\tilde{r}, \tilde{z}, \tilde{t})}{T_c} = \frac{1}{4\text{Fo}_r \sqrt{\text{Fo}_z}} \int_0^{\tilde{t}} \int_{-1/2}^{+1/2} e^{-\frac{(\tilde{z}-\tilde{\zeta})^2}{4\text{Fo}_z(\tilde{t}-\tilde{\tau})}} d\tilde{\zeta} \cdot \int_0^{\frac{\tilde{r}_r(\tilde{\tau})}{\sqrt{R}}} e^{-\frac{(\tilde{r}^2+\tilde{\rho}^2)}{4\text{Fo}_r(\tilde{t}-\tilde{\tau})}} I_0\left(\frac{2\tilde{r}\tilde{\rho}}{4\text{Fo}_r(\tilde{t}-\tilde{\tau})}\right) \tilde{F}(\tilde{\rho}, \tilde{\zeta}, \tilde{\tau}) \tilde{\rho} d\tilde{\rho} d\tilde{\tau}$$

где $T_c = \frac{m^* A \gamma R a t_e}{\lambda_r}$ – характеристическая температура, °C; A – удельная активность в Ки/м³; $\tilde{\tau}$ – вспомогательная переменная интегрирования, математически подобная \tilde{t} ; безразмерная функция пространственно-временного распределения источников тепловыделения

$$\tilde{F}(r, z, t) = \left(e^{-\Lambda R \tilde{r}^2 + (\tilde{t}-1) \cdot \chi \tilde{t}^{-1}} \cdot \left[\chi \tilde{t}^{-1} + \frac{1}{1 + \theta_{\text{Pe}} / \tilde{r}} \cdot \chi \tilde{t}^{-1} \right] \right) \cdot \chi \left(\frac{\tilde{r}_r(t)}{\sqrt{R}} - \tilde{r} \right) \cdot \chi \left(\frac{1}{2} - |\tilde{z}| \right)$$

где $\Lambda = \lambda t_e$; λ – постоянная распада источника тепловыделения, с⁻¹ (не путать с λ_r и λ_z); $\text{Pe}(r) = \frac{m^* C_w H V_\phi(r)}{C_v a}$ – число Пекле для условий данной задачи;

$\theta_{\text{Pe}} = \frac{C_w q}{2 C_v \pi a r_{\text{max}}}$ – коэффициент, рассчитанный с учетом $V_\phi(r)$ через число

Пекле $\text{Pe}(r)$, является множителем при обратно пропорциональной зависимости от r доли кондуктивного теплового потока к конвективному тепловому потоку в радиальном направлении. Ниже на рис. 7 приведены графики решения для радиогенной составляющей аномального температурного поля при различных значениях k_d и эффективной мощности H пласта-коллектора в приближении мгновенного нагнетания порции отходов с заданной суммарной активностью.

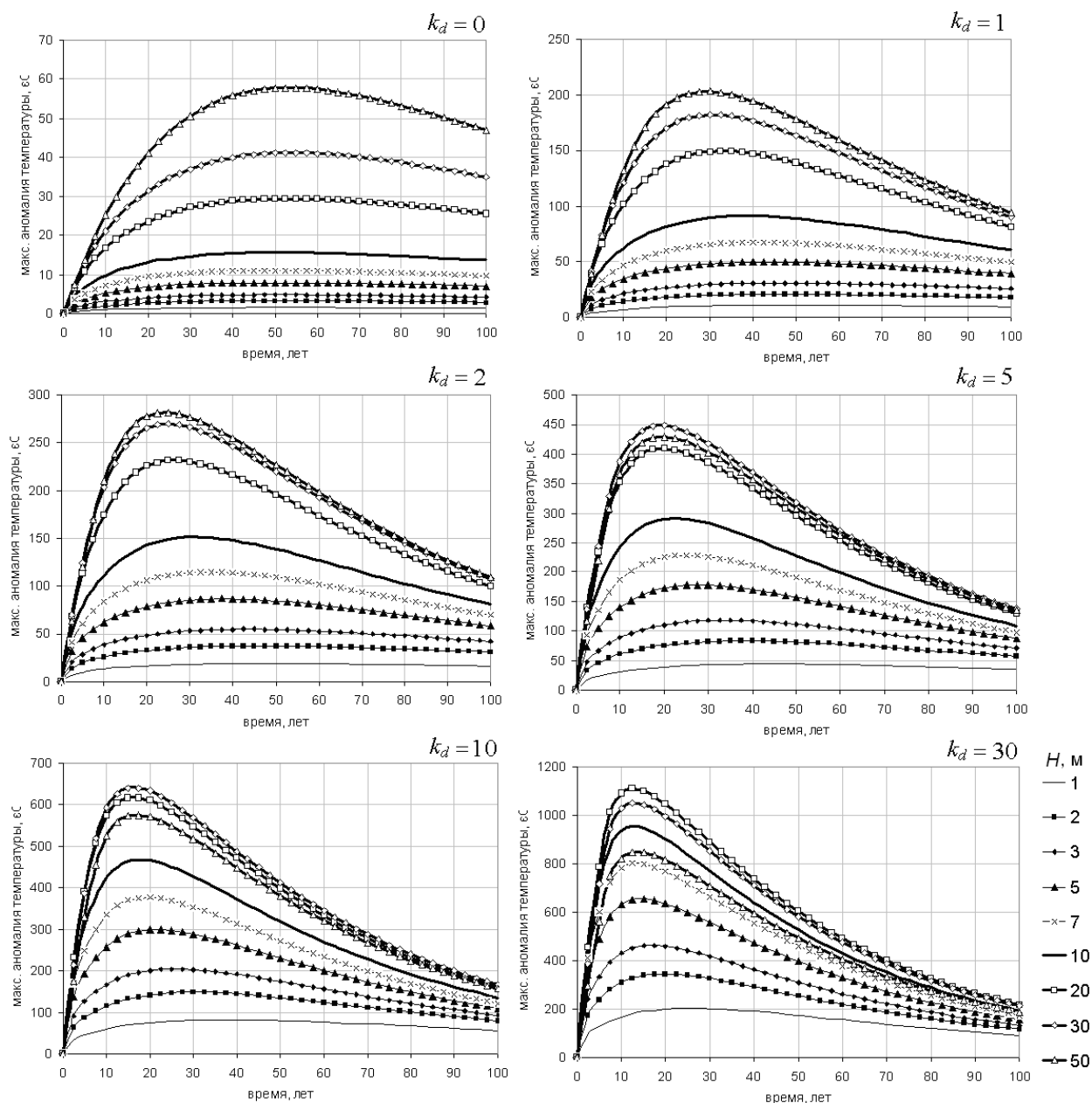


Рис. 7. Графики изменения температуры максимального радиогенного разогрева в центре пласта-коллектора $T_R(r=0, z=0, t)$ при различных значениях: эффективной мощности H пласта и коэффициенте распределения k_d при мгновенном нагнетании растворов с одинаковой первоначальной активностью в сумме $350 \cdot 10^6$ Ки, удельная активность растворов – $A_{уд}=1$ Ки/л, изотопный состав – ^{137}Cs , $V_{\phi}(r)=0$, эффективная пористость – $m^*=0,2$.

Из графиков на рис. 7 легко заметить, что, без учета конвективного искажения от нагнетательной скважины, при росте значений k_d , момент наступления времени максимального разогрева пласта-коллектора постепенно уменьшается и сдвигается до 10–20 лет. Эта особенность была положена в основу нового метода решения обратной геофизической задачи по определению параметров пространственной конфигурации тепловыде-

ляющих компонентов, но с дополнительным учетом запаздывания наступления максимума разогрева из-за конвективного влияния нагнетания растворов ЖРО. Исходными данными для подобного решения являются: момент времени наступления максимального разогрева геологической среды в окрестностях нагнетательной скважины и эффективная мощность пласта-коллектора, вмещающего тепловыделяющий компонент. Другой более сложный вариант решения этой же задачи требует наличия в качестве исходных данных: информации об удельной активности и объемах закачанных в скважину растворов ЖРО, информации об эффективной мощности пласта-коллектора и максимальной величине температурного разогрева.

Результирующее температурное поле в пласте-коллекторе вокруг нагнетательной скважины выражается в следующем виде:

$$T(r, z, t) = T_K(r, z, t) + T_R(r, z, t) .$$

Конечным результатом решения обратной задачи стало определение по динамике изменения пространственного максимума аномального температурного поля $T(r, z, t)$ в реальных пластовых условиях значения среднего радиального безразмерного коэффициента межфазного распределения k_d для тепловыделяющего радионуклидного компонента ^{137}Cs . Значение k_d определено в диапазоне 10...20 по одной выведенной из эксплуатации нагнетательной скважине, в окрестности которой сравнительно недавно было зафиксировано прохождение максимума разогрева геологической среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

В диссертации рассмотрена совокупность основных факторов, искажающих геотемпературное поле верхней части осадочного разреза. Разработаны методические рекомендации, заключающиеся в следующем – для существенного повышения результативности интерпретации и точности при изучении аномалий геотемпературного поля и его вертикальных пространственных производных первого и второго порядка, актуален обязательный учет комплекса дополнительной геолого-геофизической информации:

- вертикального распределения в разрезе величины удельной мощности теплогенерации, которая, прежде всего, связана с содержанием естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) в осадочных породах;
- данных по динамике осадконакопления в исследуемом районе;
- данных детального палеоклиматического исследования динамики колебаний приповерхностной температуры за последний плейстоцен-голоценовый цикл оледенения (123 тыс. л.), с расчетом глубины промерзания и времени оттаивания криогенной толщи в изучаемом разрезе, с учетом переменных по глубине теплофизических свойств пород;

- данных вертикального распределения неоднородностей и интегрального значения теплопроводности, а также вертикального распределения и температурной зависимости для других теплофизических характеристик пород осадочного разреза;
- данных по поверхностным температурным условиям: участки аномалий средних годовых приповерхностных температур, карты пространственного распределения суммарного снегонакопления, значения температурных параметров крупных естественных и антропогенных нарушений естественных ландшафтов, результаты изучения хронологии формирования неоднородностей ландшафта естественного и антропогенного происхождения в голоцене;
- данных картирования гидрогеодинамического поля в разрезе исследуемого района: изучение как горизонтальных градиентов напора подземных вод в проницаемых интервалах разреза, так и вертикальных градиентов напора подземных вод для оценки направлений и абсолютных значений средней скорости межпластового перетекания в областях питания и разгрузки регионального потока фильтрации;
- данных гидрогеохимических исследований по определению пространственной зональности компонентов химического и изотопного состава подземных вод исследуемого разреза.

Выполнение и учет всех перечисленных выше условий позволит вывести гидрогеотермические исследования на принципиально новый качественный уровень и, при максимально полной дополнительной информации, даст возможность для получения новых и уточнения имеющихся данных, а именно:

- параметров динамики средней многолетней приповерхностной палеотемпературы в последнем цикле оледенения;
- температурной амплитуды плейстоцен-голоценового потепления;
- момента времени палеоклиматического перехода от плейстоцена к голоцену;
- времени продолжительности деградации плейстоценовой криогенной толщи, а также длительности существования гидрогеотермического режима современного типа в изучаемом разрезе;
- параметров функции вертикального распределения теплогенерирующих источников в изучаемом разрезе;
- оценки разобщенности водоносных горизонтов и скоростей межпластового перетекания.

Гидрогеотермические измерения обязательно должны сопровождаться следующим комплексом наземных климатологических исследований: картирование средних годовых приповерхностных температур, снегомерная съемка, стандартные метеорологические наблюдения, а также должны сопровождаться методами ГИС: методами определения теплофи-

зических характеристик пород, методами определения удельной теплогенерации в разрезе (гамма-спектрометрический метод), методами по определению проницаемости и пористости пород и комплексом методов оценки технического состояния скважин.

В диссертации выполнено решение обратной геофизической задачи по определению параметров пространственной конфигурации тепловых источников в геологической среде, основанное на изучении временной динамики параметров аномального техногенного геотемпературного поля. Наряду с полигоном подземного захоронения ЖРО СХК, где аномальные температурные поля возле некоторых выведенных из эксплуатации нагнетательных скважин проходят или уже прошли стадию максимального разогрева, подобные исследования по определению значений коэффициентов межфазного распределения основных тепловыделяющих радионуклидов возможны также и на аналогичном по назначению полигоне захоронения ЖРО – «Северный» Горно-химического комбината (ГХК), г. Железногорск, Красноярский край.

В диссертации, путем решения обратной задачи теплопроводности, определен методом скважинной термометрии в пластовых условиях средний коэффициент межфазного распределения радионуклида ^{137}Cs в геологической среде, что позволяет существенно повысить достоверность прогнозных расчетов по долговременной динамике аномальных температурных полей разогрева геологической среды на полигонах подземного захоронения ЖРО, а также дает возможность надежно обосновывать регламентные ограничения на максимальные значения суммарной β -активности компонентов ЖРО, что является гарантией предотвращения в будущем развития аварийных геотехнологических процессов в пласте-коллекторе, вмещающем ЖРО.

Основные публикации по теме диссертации

в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. **Заведий Т. Ю.** Моделирование температурного поля при нагнетании технологических жидких радиоактивных отходов в пласт-коллектор // Известия ТПУ. – 2010. – Т.317.– №1. – С. 188–194.
2. Ерофеев Л. Я., **Заведий Т. Ю.** К определению поправки за палеоклиматический фактор для коррекции результатов геотермических исследований. // Геофизика. –2010. – №5. – С. 48–52.

в других изданиях:

1. **Заведий Т. Ю.** Изучение геотермического разреза в Томском районе // Сборник научных трудов XII Международного симпозиума им. ак. М. А. Усова – Томск, ТПУ. – 14-17 апреля. 2008 г. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – С. 300–302.

2. **Заведий Т. Ю.** Изучение геотермического разреза в Томском районе // Минерально-сырьевая база Сибири: история становления и перспективы: Материалы научно-практической конференции в рамках Международного форума, посвященного 100-летию первого выпуска горных инженеров в Сибири и 90-летию Сибгеолкома. Том I. Полезные ископаемые - Томск, ТПУ, ИГНД. – 10-13 ноября 2008 г. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – С. 356–358
3. Ерофеева Г. В, **Заведий Т. Ю.** Оценка нижней границы значений средней годовой палеотемпературы в период последнего ледникового минимума по современным данным гидрогеологии, гидрогеохимии, геотермии и климатологии на территории Томского района // Сборник научных трудов 7-ой международной научно-технической конференции «Современные технологии освоения минеральных ресурсов», часть II, под. ред. д. техн. Н. В. Е. Кислякова, 23-25 апреля 2009 г., г. Красноярск. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 170–178.
4. **Заведий Т. Ю.**, Зубков А. А., Сухоруков В. А., Ерофеев Л. Я., К методике определения коэффициента теплопроводности пород по данным скважинной термометрии // Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири», форум «Нефть, газ, геология 2007», г. Томск. – Томск: Изд. ТПУ, 2007. – С. 117–126.
5. **Заведий Т. Ю.** Экологические задачи, решаемые при помощи метода скважинной термометрии // Молодежь ЯТЦ: наука и производство. Материалы научно-практической конференции молодых специалистов и аспирантов, 13–17 ноября 2007 г., г. Северск. – Северск: изд. СГТА, 2007. – С. 117–120.
6. **Заведий Т. Ю.** Исследование аномальных геотемпературных полей, возникающих в процессе глубинного захоронения нетехнологических низкоактивных отходов СХК // Молодежь ЯТЦ: наука, производство и экологическая безопасность. Материалы отраслевой научно-практической конференции молодых специалистов и аспирантов, 18–22 ноября 2008 г., г. Северск. – Северск: изд. СГТА, 2008. – С. 102–106.