

*на правах рукописи*



**КИРЕЕВА Ольга Александровна**

**ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СОЛЯНОКУПОЛЬНЫХ СТРУКТУР  
ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ В НИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

**Специальность 25.00.36 - Геоэкология**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

**Москва-2005**

Работа выполнена в лаборатории тепломассопереноса Геологического института Российской академии наук и на кафедрах экологического мониторинга и прогнозирования и геоэкологии Российского университета дружбы народов

**Научный руководитель:** доктор геолого-минералогических наук, профессор **Михаил Давыдовым Хуторской**

**Официальные оппоненты:**

доктор геолого-минералогических наук, профессор **Вадим Дмитриевич Скарятин**  
кандидат геолого-минералогических наук **Сергей Владимирович Юдинцев**

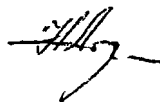
**Ведущая организация:** Институт геофизики Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург)

Защита состоится «12» мая 2005 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д.212.203.17 в Российском университете дружбы народов по адресу: 117923, Москва, Подольское шоссе, д. 8/5, экологический факультет РУДН.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу: 117198 г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Автореферат разослан «22» апреля 2005г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук, профессор



НА. ЧЕРНЫХ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследований.** В настоящее время в окружающей среде присутствует большое количество искусственных (антропогенных) радионуклидов. Причины их возникновения - это деление ядер, ядерный синтез и нейтронная активация. Основными источниками поступления радионуклидов в биосферу являются следующие процессы:

1. Неуправляемые ядерные реакции: а) испытания ядерного оружия (до объявления моратория на проведение ядерных взрывов в 1986 г.); б) технические взрывы (сейсмическое зондирование, создание плотин, дробление руды, создание подземных хранилищ газа и др.); в) аварии на предприятиях ядерного топливного цикла.

2. Управляемые ядерные реакции, осуществляемые в ядерных реакторах: атомных электростанций (АЭС), атомного морского флота, научно-исследовательских реакторах.

3. Заключительные этапы ядерного топливного цикла: переработка облученного ядерного топлива на радиохимических заводах (РХЗ); захоронение радиоактивных отходов.

Превалирующий вклад в образование радиоактивных отходов (РАО) вносят предприятия ядерного топливного цикла. Основное количество РАО (99% по активности) сосредоточено на предприятиях ПО «Маяк», Сибирском химическом комбинате и Горно-химическом комбинате.

В настоящее время принята следующая схема обращения с отходами высокой удельной активности (*Доклад МАГАТЭ, 2003*):

- хранение в жидкой форме до снижения остаточного тепловыделения (распада короткоживущих изотопов);
- отверждение и хранение в контролируемых условиях;
- окончательное захоронение твердых отходов в геологических формациях.

Захоронение радиоактивных отходов в стабильных геологических формациях - единственная реально осуществимая в настоящее время технология изоляции этих опасных материалов от биосферы. Один из ключевых моментов обеспечения безопасности будущего могильника - выбор участка с геологической средой, способной гарантировать долгосрочную изоляцию радионуклидов.

В качестве потенциально пригодных для захоронения РАО в настоящее время рассматривают следующие породы: *скальные* (США, Россия, Япония, Индия и некоторые другие страны); *глинистые* (Бельгия, Швейцария, Великобритания, Нидерланды, Италия); *многолетнемерзлые* (Россия), *геологические формации каменной соли* (Германия, США, Россия).

При подземной изоляции РАО основной технологической нагрузкой является тепловыделение, которое ухудшает прочностные и меняет фильтрационные характеристики массива пород, существенно влияет на размеры и конструктивные особенности захоронения, способствует разрушению матрицы отвержденных РАО. Мероприятия по снижению температуры в могильнике требуют дополнительных материальных затрат. В этой ситуации использование геологической среды, способной эффективно отводить избыточное тепло за счет особых теплофизических свойств, может быть возможным решением проблемы. Из горных пород наибольшей теплопроводностью обладает каменная соль, что делает ее особенно привлекательной для использования в выше обозначенных целях.

Настоящая работа посвящена изучению теплофизических свойств каменной соли, выяснению зависимости между температурой среды и теплопроводностью породы, моделированию термической эволюции потенциального захоронения РАО. Исследование посвящено одной из нерешенных проблем атомной энергетики, что определяет его актуальность.

**Цель исследований** - оценка пригодности солянокупольных структур для захоронения долгоживущих радиоактивных отходов по теплофизическим критериям на основе математического моделирования.

Для реализации указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Оценка потенциальной вмещающей среды захоронения РАО с помощью геологических критериев в отношении физико-механических, теплофизических, фильтрационных, сорбционных и др. свойств; изучение геоморфологических, гидрогеологических, геолого-гидрогеологических и др. условий;

2. Измерение теплофизических свойств каменной соли, выявление зависимости величины теплопроводности штата от изменения /Т-условий;
3. Проведение теплофизического моделирования процесса термической эволюции вмещающей среды (соляного купола) после захоронения радиоактивных отходов.

**Объектами исследования** являлись: образцы горных пород из эвапоритовых бассейнов (*Прикаспийская впадина, район Оренбурга, РФ; Приютская впадина, Солегорское месторождение, Белоруссия*), геологические разрезы, схемы тектонического строения, данные геотермических измерений в скважинах.

#### **Фактическая основа исследования**

Для обоснования тезисных положений автором использованы результаты собственных исследований по определению химического состава, плотности, пористости, теплофизических свойств отобранных образцов, изучению зависимости теплопроводности образцов каменной соли от РГ-условий; численного моделирования тепловой эволюции района захоронения РАО, а также научный материал, опубликованный в отечественной и зарубежной литературе. Этот материал охватывает публикации по проблемам развития атомной энергетики, ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и обращению с радиоактивными отходами; изучению и оценке геологических формаций-потенциальных вмещающих сред для захоронения РАО, моделированию эволюции могильника РАО; методике измерения теплофизических свойств и справочным данным по петрофизике горных пород и полезных ископаемых.

Список литературы содержит более 150 названий монографий и статей, касающихся исследованных вопросов и содержащих данные по России и зарубежным странам.

#### **Защищаемые положения:**

1. Теплопроводность каменной соли уменьшается с увеличением температуры. Установлена численная зависимость между этими параметрами;
2. Локализация искусственных радионуклидов в приповерхностной зоне приводит к изменению термического баланса литосферы. Количественное

моделирование термической эволюции могильника РАО проводится в интервале нестационарного теплового режима;

3. Благоприятный термический режим в теле соляного купола после захоронения РАО возможен только при мощности тепловыделения источника до  $100 \text{ Вт/м}^3$ , что на порядок меньше реальной мощности тепловыделения остеклованных высокорadioактивных отходов.

#### Научная новизна

1. Получены новые данные в изучении теплофизических свойств каменной соли, зависимости величины теплопроводности каменной соли от температуры и от всестороннего давления и температуры.
2. Рассчитана поверхностная тешгагенерация горных пород предполагаемого района захоронения за счет радиоактивного распада естественных радионуклидов  $U$  и  $Th$ . Проведена оценка вклада искусственных радионуклидов, входящих в состав РАО в термический баланс литосферы.
3. Впервые количественно, на основе численного моделирования, оценена степень разогрева могильника радиоактивных отходов в солянокупольной структуре за счет спонтанного распада радионуклидов, содержащихся в РАО.

#### Практическая значимость исследования

Результаты и методология работы могут быть использованы при комплексной оценке потенциальной геологической среды захоронения тепловыделяющих промышленных отходов и моделировании термической эволюции литосферы после захоронения РАО.

Публикации и апробация работы;

По теме диссертации автор имеет 11 публикаций.

Основные положения диссертации докладывались на VI международной конференции «Новые идеи в науках о Земле», г. Москва (2003); Вторых научных чтениях памяти ЮЛ Булашевича, г. Екатеринбург (2003); Всероссийской конференции «Генезис нефти и газа», г. Москва (2003); Четвертой Российской конференции по радиохимии «Радиохимия-2003», г. Озерск, 2003; Международной

конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2004», г. Москва (2004); Третьей всероссийской молодежной научной конференции по фундаментальным проблемам радиохимии и атомной энергетики, г. Нижний Новгород, (2004); Шестой международной конференции по ядерной и радиохимии (NRC-6), г. Аахен, Германия (2004); Международной конференции «Экология антропогена и современности: природа и человек», гг. Волгоград - Астрахань - Волгоград (2004).

За активное участие во II Всероссийском Конкурсе творческой молодежи по радиохимии и предоставлении конкурсного доклада на тему «Изоляция радиоактивных отходов в геологической среде и ее возможные альтернативы» (2003) автор получил благодарность Бюро межведомственного научного совета при Президиуме РАН и Минатоме РФ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 10 таблиц и 35 рисунков. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов и списка литературы, включающего 152 наименования.

### **Благодарности**

Автор глубоко признателен своему научному руководителю, профессору М.Д. Хуторскому, за всестороннюю поддержку и неизменное внимание к работе, за предоставление фактических данных и программного обеспечения. СМ.Ляпунову за помощь в проведении химического и рентгеноспектрального анализов (ГИН РАН); Ю.Л. Попову, Д.В. Коробкову, Д.А. Миклашевскому и всему коллективу лаборатории проблем геотермии МГГРУ за бесценную помощь в постановке экспериментов; Б.И. Омеляненко, Б.Т. Кочкину, В.И. Мальковскому (ИГЕМ РАН) за информационную поддержку; М.И. Антипову, В.И. Кононову, Б.Г. Поляку (ГИН РАН), акад. РАН Б.Ф. Мясоедову, И.Г. Тананаеву (ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН), А.А. Касьяпенко, В.Р. Ахмедзянову (кафедра радиозологии экологического факультета РУДН) за обсуждение результатов работы и ценные замечания.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматриваются «Перспективы развития атомной энергетики», ее преимущества и недостатки. К преимуществам относятся относительно большие запасы ядерного топлива, щадящее воздействие предприятий атомного комплекса на окружающую среду и возможность строительства АЭС без привязки к месторождениям радиоактивных руд, поскольку их транспортировка не требует существенных затрат в связи с малыми объемами сырья. К недостаткам - проблемы, связанные с утилизацией и захоронением радиоактивных отходов, а также с ликвидацией самих АЭС после окончания срока эксплуатации. На основании литературных источников проведено сравнение АЭС и ТЭС по расходу топлива и воздействию на природную среду. Обозначены факторы воздействия атомных электростанций на природу. Проанализирована ситуация, которая складывается в мире вокруг ядерной энергетики после крупных аварий в атомном энергетическом комплексе, и причины, по которым отдельные страны приняли решение о запрете эксплуатации АЭС.

Рассмотрены особенности открытого и замкнутого ядерного топливного цикла, вопросы переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ), приведена классификация радиоактивных отходов и схема обращения с ними.

Во второй части главы изложены требования, которым должны удовлетворять матричные материалы для связывания осколочных радионуклидов и малых актинидов. Например, способность связывать и удерживать в виде твердых растворов возможно большее число радионуклидов (РН) и продуктов их распада в течение длительного (по геологическим масштабам) времени, быть устойчивым материалом по отношению к процессам физико-химического выветривания в условиях длительного хранения, обладать термической устойчивостью при высоких содержаниях РН и другие. Приведена сравнительная характеристика матричных материалов, термическая и радиационная устойчивость и теплофизические свойства остеклованных радиоактивных отходов. Указывается, что в результате долговременного хранения остеклованных отходов высокого уровня активности в условиях повышенной температуры возможно изменение химической стойкости матрицы и скорости выщелачивания радионуклидов при последующем контакте

матриц с водой. Основная причина этих явлений заключается в структурном изменении матрицы, ведущем к ее расстегиванию и кристаллизации.

Во второй главе освещается «Проблема выбора геологической **формации для захоронения радиоактивных отходов**». Несмотря на то, что пока нет ни одного действующего предприятия по захоронению высокорadioактивных отходов в глубокие геологические формации, проектные исследования в этой области во многих странах продвинулись достаточно далеко. В России системное решение проблемы выбора геологической среды для захоронения РАО дано Б.Т. Кочкиным. Методом выявления геологических условий, влияющих на безопасность системы захоронения, послужил анализ причинно-следственных связей факторов, способных вызвать аварии в системе захоронения в виде утечек радионуклидов, и ущерба, наносимого окружающей среде загрязнением радионуклидами. Из этих причинно-следственных связей вычленились потенциально опасные геологические условия.

Рассмотрен опыт изучения и использования соляного купола Горлебен (Германия) и проект создания подземной лаборатории в соляном куполе Большой Азгир (Западный Казахстан). Выявлены преимущества соляных отложений по сравнению с другими геологическими образованиями.

Дается определение каменной соли, ее химический и минералогический состав, физические свойства. Рассматриваются процессы образования эвапоритовых бассейнов, гипотезы формирования соляных структур, закономерности роста соляных куполов. Приводится классификация соляных структур, их распространение и районирование в Прикаспии.

Указывается, что интерес к геологическим формациям каменной соли как потенциальной вмещающей среде захоронения радиоактивных отходов требует многофакторного анализа физических, физико-химических, механических свойств и условий залегания этой породы, прогноза их изменения после размещения могильника РАО и построения различных сценариев эволюции захоронения. Приводятся результаты изучения трещинно-порового пространства каменной соли, совместного действия радиации и увлажнения на реологические свойства галита, обзор исследований по оценке безопасности захоронений радиоактивных отходов и моделированию процессов в каменной соли после захоронения РАО.

Третья и четвертая главы посвящены результатам исследования.

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Для проведения экспериментальной части работы в кернохранилище Нижне-Волжского НИИ геологии и геофизики были отобраны 70 образцов природных минералов (керновый материал, добытый в северо-восточной части Прикаспийской впадины).

В лаборатории проблем геотермии Московского геолого-разведочного университета (МИРУ) были определены теплофизические свойства образцов, их плотность и пористость.



Рис 1. Теплопроводность минералов, измеренная методом бесконтактного сканирования в лаборатории проблем геотермии МГГРУ.

Методы определения теплофизических параметров твердых тел базируются на решении уравнения теплопроводности:

$$\partial T / \partial t = a \nabla^2 T,$$

где  $\nabla^2$  - оператор Лапласа,

$$\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$$

Теплофизические свойства природных образцов каменной соли были измерены методом бесконтактного сканирования.

Показано, что каменная соль, ангидрит (минерал, входящий в группу галогенных пород) и ангидритсодержащие (ангидрит-доломитовая и доломит-ангидритовая) породы обладают наибольшей теплопроводностью (рис. 1), но она не достигает максимальных значений, указываемых в справочниках, как мы полагаем, из-за наличия примесей.

### ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ КАМЕННОЙ СОЛИ

В лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН был проведен анализ содержания в природных образцах каменной соли химических элементов Na, K, Ca, Ш, Cl (рис 2,3).

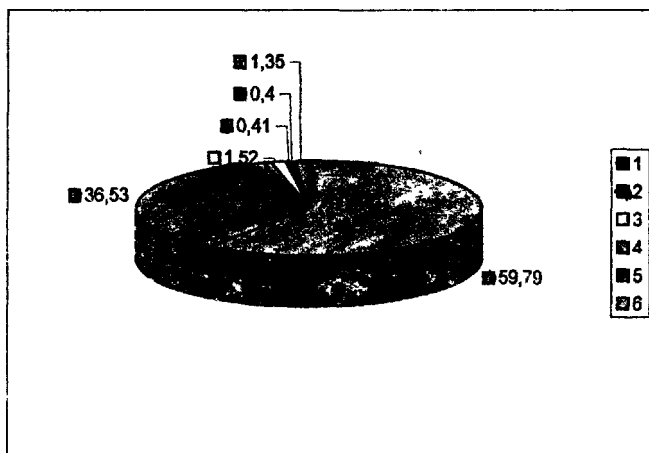
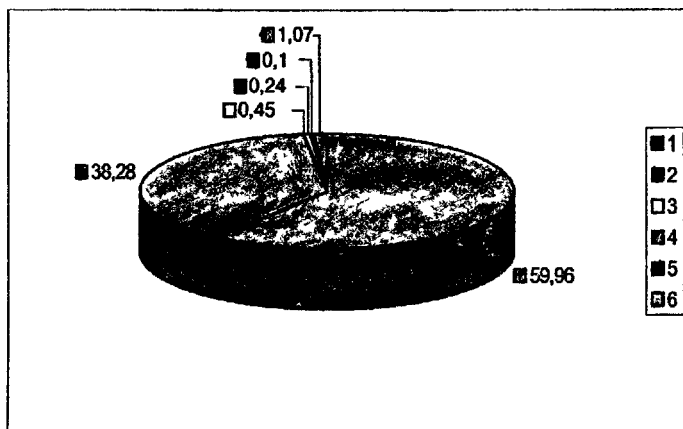


Рис.2. Образец №1. 1 – Cl (59,79%), 2 – Na (36,53%), 3 – K (1,52%), 4 – Ca (0,41%), 5 – Mg (0,4%), 6 – примеси (1,35%).



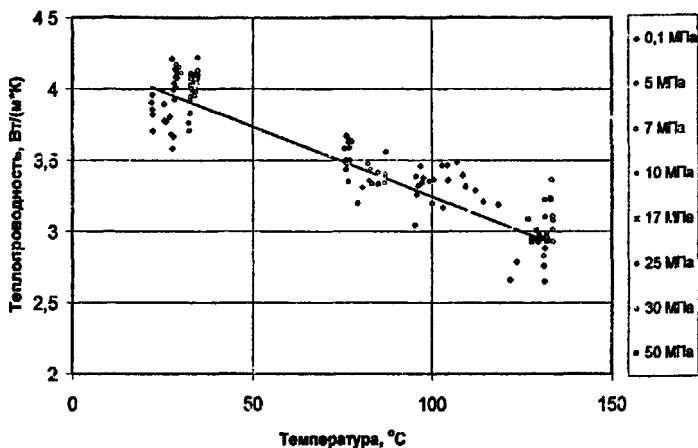
**Рис. 3. Образец №2. 1 – Cl (59,96%), 2 – Na (38,28%), 3 – K (0,45%), 4 – Ca (0,24%), 5 – Mg (0,1%), 6 – примеси (1,07%).**

Теплопроводность образцов каменной соли №1 и III находится в интервале 4,0-4,5 Вт/(мК) и не достигает максимальных значений, присущих минералу галит по справочным данным.

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КАМЕННОЙ СОЛИ ОТ ВСЕСТОРОННЕГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

В лаборатории проблем геотермии МГГРУ было проведено изучение зависимости величины теплопроводности галита от всестороннего давления и температуры. По полученным данным был построен график (рис 4) и установлено следующее:

1. При увеличении температуры образца с 25° до 130°С в условиях постоянного давления теплопроводность соли понижается с 4.00 до 2.78 Вт/(мК).
2. В экспериментах, когда изменения температуры от 25° до 130°С сопровождались одновременными изменениями давления в пределах 0.1...50 МПа, обнаружено, что зарегистрированные изменения теплопроводности обусловлены изменениями температуры, а изменения теплопроводности в связи с изменениями давления находятся в пределах погрешности эксперимента. Таким образом, значимого влияния давления на теплопроводность не обнаружено.



**Рис. 4. График зависимости величины теплопроводности образца галита от всестороннего давления и температуры**

3. Установленная в результате эксперимента (число измерений  $n \sim 165$ ) зависимость теплопроводности соли от температуры может быть аппроксимирована следующим уравнением:

$$\lambda = -0,0112 \cdot T + 4,371,$$

где  $\lambda$  - теплопроводность,  $Вт/(м \cdot К)$ ,  $T$  - температура,  $^{\circ}С$

4. Погрешность измерения теплопроводности составляет 6%

Измерения проводились на измерительной установке разработки МГГРУ, обеспечивающей измерения теплопроводности при одновременном воздействии температуры и давления (Ертоградский, Попов, Миклашевский, 2003) в лаборатории проблем геотермии МГГРУ.

## **РАДИОГЕННАЯ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЯ В ТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ЛИТОСФЕРЫ**

Распад радиоактивных элементов протекает с высвобождением большого количества энергии в форме тепла. Это необходимо учитывать при выборе типа геологической среды и проектировании в ней хранилища РАО, потому что степень тепловыделения влияет не только на конструктивные особенности

хранилища, но и на термический режим литосферы. Термический режим литосферы континентов и океанов контролируется балансом между подачей тепла к ее основанию, теплогенерацией и/или поглощением тепла внутри нее и потерями энергии через ее верхнюю поверхность.

Основными теплогенерирующими процессами внутри литосферы являются радиоактивный распад, экзотермические химические реакции, фазовые переходы и трение. В современном тепловом режиме литосферы определяющим является тепло распада долгоживущих изотопов урана, тория и калия:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ . Основными компонентами измеренного теплового потока в стабильных континентальных областях являются радиотеплогенерация в коре и тешопоток, поступающий из мантии. Разделение этих компонентов можно сделать на основании открытой Ф.Берчем и его соавторами (*Birch et al*, 1968) линейной связи между тепловым потоком и поверхностной теплогенерацией:

$$q_{\text{пог}} = q_{\text{ред}} + DA_{\text{пог}}$$

где  $q_{\text{пог}}$  и  $q_{\text{ред}}$  соответственно измеренный и редуцированный тепловые потоки.

Радиогенная составляющая  $A_{\text{пог}}$  вычисляется по формуле (*Birch et al*, 1968):

$$A_{\text{пог}} (\text{мкВт} / \text{м}^3) = 0,132\rho(0,718U + 0,193Th + 0,262K),$$

где  $U, Th$ - концентрации урана и тория в  $\text{г}/\text{м}^3$ ,  $K$ - вес %;  $\rho$  - плотность,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНО-СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИИ

Содержание радиогенных элементов  $U$  и  $Th$  в отобранных образцах пород определялось путем рентгеноспектрального анализа в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН. Содержание  $^{40}\text{K}$  не учитывалось. Результаты рентгеноспектрального анализа образцов подтвердили справочные данные об относительно невысоком содержании радиоактивных изотопов в горных породах эвапоритовых бассейнов. Результаты расчета поверхностной теплогенерации пород использовались в математическом моделировании термической эволюции захоронения РАО в теле соляного купола.

Прогнозирование времени установления квазистационарного теплового поля соляного купола после захоронения в нем тепловыделяющих элементов.

Размещение могильника РАО в структуре литосферы может рассматриваться как внутренняя деформация, которая повлечет за собой нарушение квазистационарности ее термической структуры. Для прогнозирования времени установления квазистационарного теплового поля соляного купола после захоронения в нем тепло выделяющих элементов применялся критерий Фурье:

$$\tau = H^2 / 4a,$$

где  $\tau$  – время, сек;  $H$  – глубина, м;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/сек.

Для каменной соли при глубине захоронения тепло выделяющих элементов 1500 м это время равно ~ 9000 лет. Таким образом, количественное моделирование, выполненное для расчета времени и величины разогрева в камере захоронения, относится к интервалу нестационарного теплового режима.

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В СОЛЯНОМ КУПОЛЕ ПОСЛЕ ЗАХОРОНЕНИЯ В НЕМ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Геотермическое моделирование предполагает использование специальных программ, приспособленных для применения в реальной геологической среде. Программный комплекс «TERMGRAF», разработанный для решения задач нестационарной теплопроводности, позволяет в диалоговом режиме задавать или изменять при необходимости любые условия или параметры. Данный пакет программ составлен М.Д. Хуторским совместно с В.С. Кудрявцевым и С.А. Перфильевым (МГТУ им. Ч. Баумана).

Для решения используется численный метод конечных элементов с квадратичной аппроксимацией функции температуры между узлами прямоугольной сетки. В программе предусматривается сетка 41×41 узел (т.е. решается двумерная задача), линейные размеры по осям X и Z возможно изменять по требованию оператора. На боковых границах области моделирования в программе задается отсутствие латерального потока, т.е.  $dT/dx=0$ . на верхней и нижней границах возможно задавать как температуры, так и тепловые потоки. Внутри области моделирования требуется задать конфигурацию контрастных сред и их теплофизические свойства: температуропроводность -  $a$  (м<sup>2</sup>/с), теплопроводность -  $\lambda$  (Вт/м·К) и плотность тепловых источников -  $Q/(c-p)$  (К/с). Весь набор исходных данных, включая значение начальной температуры, от

которой начинается итерационный процесс, задается в программе «ENTGRAF». В расчетной части комплекса (программа «TERM») задаются линейные размеры области моделирования ( $L_x$  и  $L_z$ , км), которые определяют линейные размеры узла сетки ( $L_x/41$  и  $L_z/41$ ), а также временной шаг (*в млн лет*). В результате численного решения уравнения:

$$\lambda d^2T/dx^2 + \lambda d^2T/dz^2 + Q = cpdT/dt \quad (1)$$

получаем распределение температур и тепловых потоков  $q(z)$  и  $q(x)$  для выбранного временного шага. Результаты расчетов в графическом виде можно отобразить на мониторе с помощью программы «TERMGRAF». Полученный файл результатов переименовывается в файл начальных температур, и на следующем временном шаге начинается расчет с конечного момента предыдущего временного шага. Возможность дискретизации решения удобна, если есть необходимость изменить структуру геологического разреза, распределение источников тепла (*Хутурской, 1996*).

Необходимо отметить, что на начальном этапе моделирования, результаты которого изложены в настоящей работе, имеется целый ряд допущений, сокращение числа которых должно стать одной из основных задач при продолжении исследований в этой области. Принимается, что:

1. соляной купол представляет собой однородный массив каменной соли мощностью от 4 км;
2. захораниваемые огходы освобождены (путем выдержки или химическими методами) от коротко- и среднеживущих радионуклидов и представляют собой долгоживущие радионуклиды с периодом полураспада от 1000 лет. Снижение теплогенерации с течением времени за счет распада радиоактивных элементов при использовании данного программного обеспечения не учитывается, поэтому величина тепловыделения от источника принимается постоянной.
3. исключается химическое взаимодействие между камерой захоронения и вмещающей средой и все процессы в земной коре, которые оно может инициировать;
4. задача нестационарной теплопроводности решается в двумерном приближении для уравнения:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q$$

При такой постановке вопроса поле температур инвариантно относительно сдвига вдоль оси  $z$  (перпендикулярной координатам  $x$  и  $y$ ). В этом случае полученное решение соответствует источнику тепловыделения, имеющему вид цилиндра с осью, параллельной оси  $z$ , и основаниями, соответствующими заданной области тепловыделения в плоскости  $x$ - $y$ . Такая постановка задачи не совсем точно описывает тепловой режим реального хранилища.

Моделирование проводилось в два этапа: «Построение модели» и «Модификация модели» (с учетом изменения величины теплопроводности при повышении температуры).

#### 1. Построение модели.

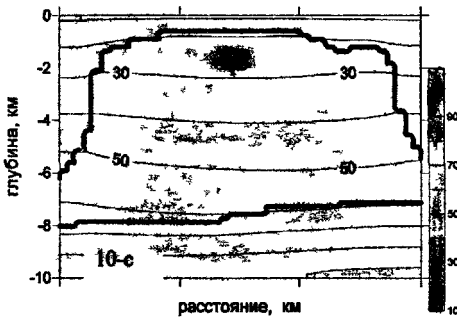
*Постоянные параметры:* длина региона, 15 км; глубина региона, 10 км; теплопроводность каменной соли  $\lambda=4,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ; теплопроводность вмещающих терригенных пород  $\lambda=2,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ; температуропроводность каменной соли  $a=15,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ; удельная теплоемкость каменной соли  $c=2557 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ; плотность каменной соли  $2,15 \text{ г}/\text{см}^3$ ; мощность источника тепловыделения  $5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

*Меняющиеся параметры:* расчетное время: 10, 100, 1000 лет.

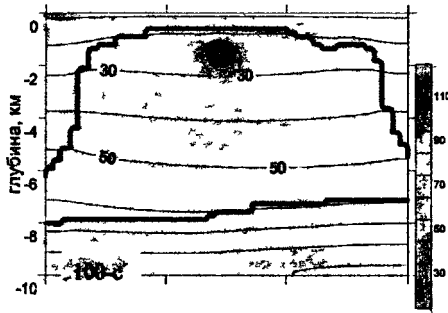
Результаты моделирования в графическом виде представлены на рис. 5.

Моделирование показало, что за 10, 100 и 1000 лет раюгрев геологической среды, вмещающей камеру захоронения РАО, составит соответственно 90, 110 и 200°С. Высокая теплопроводность пород солянокупольной структуры будет способствовать постепенному и равномерному рассеиванию избыточного тепла в теле купола.

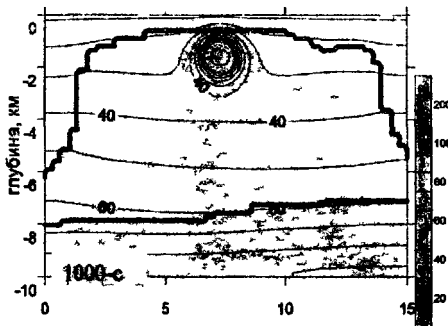
а)



б)



в)



**Рис. 5. Построение модели («с» означает независимую от температуры теплопроводность, толстые линии – контур купола, тонкие линии - изотермы)**

## 2. МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

При модификации модели теплопроводность каменной соли изменяли в соответствии с уравнением, полученным при изучении зависимости величины теплопроводности от температуры.

*Постоянные параметры:* длина региона, 15 км; глубина региона, 10 км; теплопроводность вмещающих терригенных пород  $\lambda=2,3$  Вт/(мК); температуропроводность каменной соли  $a=15,6 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с; удельная теплоемкость каменной соли  $c=2557$  Дж/(кг·К); плотность каменной соли 2,15 г/см<sup>3</sup>; мощность источника тепловыделения 5 Вт/м<sup>3</sup>.

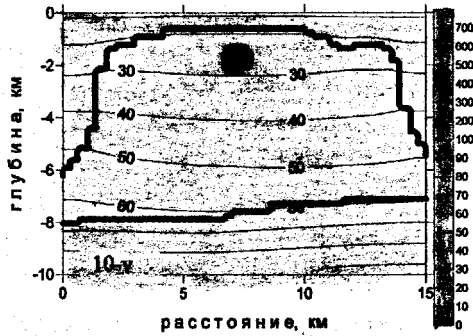
*Меняющиеся параметры:* теплопроводность каменной соли  $\lambda=4,5; 3,5; 3$  Вт/мК; расчетное время: 10, 100, 1000 лет.

Моделирование показало, что при мощности источника тепловыделения равной 5 Вт/м<sup>3</sup> теплопроводность каменной соли уменьшается незначительно, что не является препятствием для диссипации тепла.

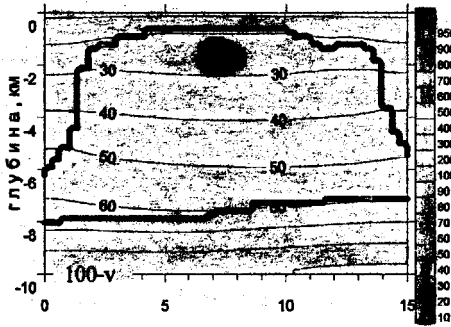
Модели *г, д, е* демонстрируют, что при мощности источника тепловыделения равной 5 Вт/м<sup>3</sup> теплопроводность каменной соли уменьшается в соответствии с уравнением, полученным при изучении зависимости величины теплопроводности каменной соли от температуры. Таким образом, избыточное тепло не отводится с той же интенсивностью, что в предыдущей модели, и происходит недопустимый разогрев геологической среды - до 700, 900 и 1400°С, соответственно, за 10, 100 и 1000 лет.

Расчет термического режима соляного купола при мощности источника тепловыделения равной 50 и 500 Вт/м<sup>3</sup> проведен аналогично. Его результаты приведены в сводном графике «Изменение максимальных температур в камере захоронения РАО во времени при мощности источника тепловыделения 5, 50, 500, 5000 Вт/м<sup>3</sup>\* (рис. 7). В специальной базе данных можно найти значение температур в каждой узловой точке модели.

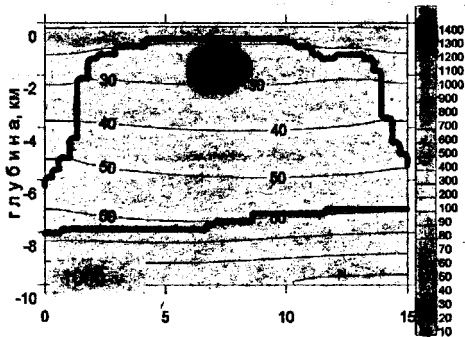
г)



д)



е)



**Рис. 6. Модификация модели («v» означает зависимость от температуры теплопроводность, толстые линии – контур купола, тонкие линии – изотермы).**

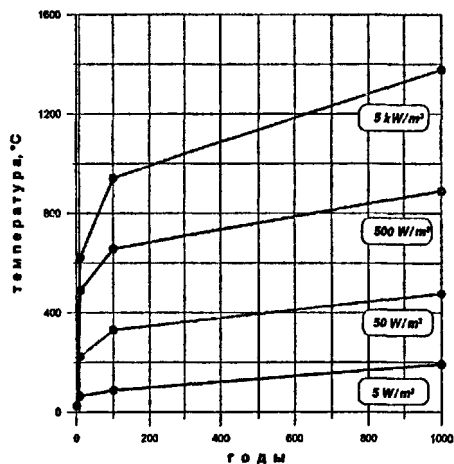


Рис 6. Изменение максимальных температур в камере захоронения РАО во времени при мощности источника тепловыделения 5,50,500,5000 Вт/и<sup>3</sup>

Полученные данные показали, что при величине теплогенерации свыше  $100 \text{ Вт/м}^3$  произойдет недопустимый разогрев геологической среды, что может привести к разрушению могильника и выходу радионуклидов в окружающую природную среду.

## ВЫВОДЫ

1. Теплопроводность природных образцов каменной соли изученного района не превышает  $4,5 \text{ Вт/(м·К)}$  и связана линейной зависимостью с температурными условиями среды (уменьшается с повышением температуры). В результате эксперимента по изучению зависимости величины теплопроводности от температуры показано, что уже при  $130^\circ\text{C}$  теплопроводность галита снижается до значения  $2,7 \text{ Вт/(м·К)}$ , что приближает его по этому параметру к терригенным породам, вмещающим соляной купол. Это значит, что при значительном разогреве зоны захоронения одно из основных преимуществ каменной соли по сравнению с другими потенциальными геологическими формациями, предложенными для захоронения РАО, теряется.
2. Поверхностная теплогенерация пород потенциального района захоронения РАО минимальна. Поэтому захоронение искусственных радионуклидов с периодами полураспада более 1000 лет в поверхностной зоне литосферы, хотя и

будет носить аномалиеобразующий характер, но к катастрофическим последствиям не приведет и завершится установлением квазистационарного теплового поля через -9000 лет. Данное утверждение справедливо только в том случае, если процесс теплогенерации рассматривается отдельно, при этом исключаются эффекты синергизма, которые могут иметь место при совместном действии двух и более факторов (например, теплогенерации и радиоактивного излучения).

3. Численное моделирование показало возможность благоприятного термического режима в теле соляного купола после захоронения РАО при мощности тепловыделения источника до  $100 \text{ Вт/м}^3$  что на порядок меньше реальной мощности тепловыделения остеклованных высокорadioактивных отходов. При мощности тепловыделения свыше  $100 \text{ Вт/м}^3$  избыточное тепло, исходящее от камеры захоронения, не сможет отводиться только за счет высокой теплопроводности геологической среды, что будет способствовать десорбции радиоактивных элементов из матрицы, нарушению стабильности геологической обстановки и последующей реализации неблагоприятного сценария развития хранилища РАО, который в конечном итоге завершится поступлением радионуклидов из зоны захоронения в окружающую среду.

Таким образом, на основании проведенного исследования, можно говорить о том, что геологические формации каменной соли (а именно, солянокупольные структуры) допустимо использовать для захоронения твердых (или отвержденных) низко- и, частично, среднерadioактивных отходов, а также радионуклидов с периодами полураспада свыше 1000 лет. Последствия захоронения высокорadioактивных отходов с теплогенерацией от 5 до  $50 \text{ кВт/м}^3$  без применения дополнительных мощных систем охлаждения, по воздействию на природную среду могут быть приравнены к экологической катастрофе.

## СПИСОК

работ, опубликованных по теме диссертации

1. О.А. Киреева. Радиоактивные отходы и проблема их захоронения в природной среде. Актуальные проблемы экологии и природопользования (выпуск 3): Сб. научн. трудов /отв. ред. М.Д. Хуторской. - М.: Изд-во РУДН, 2002. С. 384-394.
2. М.Д. Хуторской, Е.Е. Бобылова, О.А. Киреева. Трехмерная температурная модель солянокупольных структур Прикаспийской впадины. Материалы VI международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». С. 220-221. - М., 2003.
3. М.Д. Хуторской, В.И. Кононов, О.А. Киреева. О влиянии подземных вод на тепловое поле Урала. Ядерная геофизика. Геофизические исследования литосферы. Геотермия. Вторые научные чтения памяти ЮЛ. Балашевича. Материалы. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2003. С. 120-121.
4. М.Д. Хуторской, Подгорных Л.В., О.Л. Киреева. Использование термомографии для прогнозирования нефтегазоносности на Арктическом шельфе. Материалы Всероссийской конференции «Генезис нефти и газа». М., 2003.
5. В.Р. Ахмедзянов, О.А. Киреева. Альтернативные подходы к проблеме захоронения радиоактивных отходов. Вестник РУДН №7. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». М.: Изд-во РУДН, 2003. С. 160-166.
6. О.А. Киреева. Геоэкологическое изучение галогенных формаций как потенциально пригодных вмещающих сред для захоронения высокорadioактивных отходов. Четвертая Российская конференция по радиохимии. Радиохимия-2003: Тезисы докладов. Озерск, 20-25 октября 2003 г. - Озерск: ЦЗЛ ФГУП «ПО «Маяк», 2003. С. 192-193.
7. О.А. Киреева. Геоэкологическое изучение галогенных формаций... Материалы 2-й международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». М.: Изд-во РУДН, 2003 г. С. 271-273.
8. О.А. Киреева. Изучение теплового режима в теле соляного купола после захоронения радиоактивных отходов. Материалы Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2004». Секция «Химия», т.1. М., 2004. с. 149.
9. О.Л. Киреева. Геоэкологические аспекты захоронения радиоактивных отходов в соляных куполах. Третья всероссийская молодежная научная конференция по фундаментальным проблемам радиохимии и атомной энергетики. Сборник тезисов докладов. Нижний Новгород, 2004. С. 10.
10. O. Kireeva. Radioactive waste and nuclear fuel cycle back-end. Extended Abstracts of Papers presented at the Sixth International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC-6), 29 August to 3 September 2004, Aachen, Germany. P. 560-562.
11. М.Д. Хуторской, О.Л. Киреева. Термомография солянокупольных структур Прикаспийской впадины. Экология антропогена и современности: природа и человек. Сборник научных докладов, представленных на международную конференцию (Волгоград- Астрахань - Волгоград, 24-27 сентября 2004 г.). СПб: «Гуманистика», 2004. С. 62-66.

международную конференцию (Волгоград - Астрахань - Волгоград, 24-27 сентября 2004 г.). СПб: «Гуманистика», 2004. С. 62-66.

Киреева Ольга Александровна

Россия

**«Термический режим солянокупольных структур  
при захоронении в них радиоактивных отходов»**

Представлены результаты исследований теплофизических свойств горных пород эвапоритовых бассейнов и особенностей диссипация тепла солянокупольными структурами. В горных породах Прикаспийской впадины измерены: теплопроводность, температуропроводность, плотность, пористость. Изучена зависимость теплопроводности каменной соли от температуры и от всестороннего давления и температуры. Осуществлен химический и рентгеноспектральный анализ, рассчитана поверхностная теплогенерация образцов. Проведено численное моделирование термического режима в соляном куполе, сделаны выводы о времени установления квазистационарного теплового поля литосферы после захоронения тепловыделяющих промышленных отходов.

**Kireeva Olga Aleksandrovna**

**Russia**

**Thermal conditions of the banal place of the radioactive waste within salt dome**

The results of research of the thermal conditions in salt-dome-structures after nuclear waste disposal within them are submitted. The thermal conductivity, thermal diffusivity, density, porosity were measured in rock samples from Pricaspian depression. The relationship thermal conductivity of the salt - temperature and/or pressure is investigated. Chemical and X-ray-analysis of the samples were carry out. Surface heat-generation of the rocks was calculated. The numerical modeling of thermal conditions in the salt-dome after radioactive waste burial was carry out





Отпечатано в ООО «Оргсервис-2000»  
Тираж 100 экз. Заказ № 8/04-27  
Подписано в печать 08.04.2005 г.  
Москва, 115419, а/я 774, ул. Орджоникидзе, 3

25.00

19 МАЙ 2005



1300