

ЛОКАЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 03-05-65408.

Разработана методика численного моделирования конвективно-диффузионного переноса радионуклидов в мерзлых грунтах, используя методы направленных разностей. Рассмотрены различные варианты локализации радиоактивных отходов с учетом природно-климатических условий местности.

На территории многолетней мерзлоты России произведено 32 подземных ядерных взрыва (ПЯВ). Из них два «Кристалл» (02.10.74) и «Кратон-3» (24.08.78) были аварийными [1]. Районы взрыва относятся к территории Мирнинского улуса Республики Саха (Якутия), где с начала 1950-х гг. начались поиски месторождений природных алмазов, а затем их освоение. ПЯВ «Кристалл» с мощностью 1,9 кт осуществлен вблизи алмазоносной трубки «Удачная» для создания плотины хвостохранилища обогащательной фабрики на ручье Улахан-Бысыттаах (заказчик – Минцветмет СССР). ПЯВ «Кратон-3» (22 кт) произведен для сейсмического зондирования осадочного чехла земной коры по заказу Министерства геологии СССР. Масштаб аварии на «Кратон-3» несоизмеримо выше, чем на объекте «Кристалл», что, очевидно, объясняется большей массой ядерного заряда. Для локализации РАО в объекте «Кристалл» сооружен саркофаг из глыбовых материалов алмазоносного карьера «Удачный», который изменил рельеф местности. С его южного и северного склонов в летнее время стекают загрязненные радионуклидами воды и соединяются с ручьем Улахан-Бысыттаах.

В связи с этим разработана методика численного моделирования конвективно-диффузионного переноса радионуклидов с целью оценки эффективности заградительных сооружений.

1. Техногенные радионуклиды со временем включаются в биохимические циклы и постепенно переходят в почвенный раствор. Механизмом миграции радионуклидов, перешедших в водный раствор, является диффузионно-конвективный перенос. Часть радионуклидов остается в почвенно-поглощающем комплексе. Ключевыми моментами при построении математических моделей тепломассопереноса в промерзающих и протаивающих грунтах являются: способ локализации области фазового перехода; выбор формы представления уравнения влагопереноса.

В механике мерзлых грунтов широкое практическое распространение имеют математические модели многофазных сред. Для получения математической модели тепломассообмена применяют законы сохранения массы (импульса) и энергии для каждой фазы, а затем, суммируя, получают общее уравнение сохранения для всей системы. При этом систему уравнений выписывают в рамках следующих предположений [2]: скелет пористой среды, лед, поровая жидкость и воздух (газ) слабосжимаемы; пренебрегают связанной водой; при образовании льда примесь отторгается в объеме незамерзшей воды и в осадок не выпадает. Система уравнений замыкается равновесным термодинамическим условием существования льда, порового раствора и воздуха. В мерзлых дисперсных грунтах большую роль играет физическое состояние связанной воды, которое усиливается в зависимости от типа техногенного загрязнения. В зоне аэрации (в деятельном слое) обычно пренебрегают воздухом и сжимаемостью пористой среды (скелета), льда и воды. Тогда из модели многофазной среды вытекает общеизвестная модель А.В. Лыкова [3].

Известны два (структурных) способа локализации. Согласно первому из них, фазовый переход локализован на поверхности раздела фаз (при определенной температуре); второму – фазовое превращение происходит в протяженной области (так называемая модель фазового перехода в спектре температур). Становление второго подхода связано в первую очередь с экспериментальными работами, которые свидетельствовали о протекании этих процессов в мерзлых грунтах [3].

С учетом вышесказанного, распределение радионуклидов в грунте описывается в двухмерной области системой четырех уравнений [4–7]:

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_{\alpha=1}^2 \left(\frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left(\lambda^{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x_{\alpha}} \right) - c_{\alpha} V_{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x_{\alpha}} \right) + q + L \frac{\partial W_{\alpha}}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_{\alpha}}{\partial \tau} = \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left(k_{\alpha}^{\alpha} \frac{\partial H}{\partial x_{\alpha}} \right) - \frac{\partial \theta_{\alpha}}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial W_{\alpha}}{\partial \tau} = \sum_{\alpha=1}^2 \left(\frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left(k_{\alpha}^{\alpha} \frac{\partial W_{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} \right) - \delta_{\alpha 2} \frac{\partial k_{\alpha}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} \right) - \frac{\partial W_{\alpha}}{\partial \tau}, \quad (2^*)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} = \sum_{\alpha=1}^2 \left(\frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left(D^{\alpha} \frac{\partial \eta_2 S}{\partial x_{\alpha}} \right) - \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} (V_{\alpha} \eta_2 S) \right) - \lambda_r S - \frac{\partial N}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \tau} = \beta \left(S - \frac{N}{k_d} \right) + \lambda_r N, \quad (4)$$

$$(r, z) \in \Omega = [r_0, R] \cdot [0, H], \quad \tau > 0.$$

Система уравнений (1)–(4) замыкается равновесной функцией количества незамерзшей воды и условием замерзания порового раствора:

$$C_{\alpha} = k_{\alpha} C_{\alpha},$$

где c, c_{α} – объемные теплоемкости грунта и воды, Дж/(м³·К); T – температура, К; τ – время, с; x_{α} – пространственные координаты, м ($\alpha = 1, 2$); λ^{α} – теплопроводность, Вт/(м·К); V_{α} – скорость фильтрации, м/с; q – тепловыделение, Дж/(м³·с); L – объемная теплота фазового перехода, Дж/м³; $W, W_{\alpha}, W_{\alpha}$ – суммарная влажность, содержание воды в твердом и жидком состояниях, %; $\theta_{\alpha}, \theta_{\alpha}$ – объемные (отношение объема влаги к объему скелета) влажности воды и льда, %; k_{α}^{α} – коэффициент фильтрации, м/с; H – напор, м; k_{α} – коэффициент диффузии воды, м²/с; $\delta_{\alpha j}$ – символ Кронеккера; C_{α}, C_{α} – объемные концентрации радионуклидов в жидкой и твердой фазе, Ку/м³; D^{α} – коэффициент конвективной диффузии, м²/с; S – объемная активность радионуклидов в поровом растворе, Ку/м³; N – объемная активность радионуклидов в почвенно-поглощающем комплексе, Ку/м³; k_d – коэффициент распределения вещества; β – коэффициент скорости обмена, 1/с; η_2 – доля засоленности, которая участвует в процессе фильтрации (диффузии); λ_r – константа распада радионуклидов, с⁻¹; k_{α} – коэффициент, характеризующий замерзание радионуклидов вместе с грунтовой влагой.

Влагоперенос можно описать в потенциальной (2) и влажностной (2*) формах. Потенциальная форма получается из влажностной путем замены переменной. Для потенциальной формы нужно установить функциональные зависимости объемной влажности и коэффициента фильтрации от порового давления, а для влажностной формы – зависимость от суммарной влажности, которая легко восстанавливается на практике. Перенос примеси учитывает процесс сорбции почвенно-поглощающего комплекса (4).

2. Для численного решения системы дифференциальных уравнений (1)–(3) в области $\Omega = [0, H]^* [0, \tau_{\max}]$ введем неравномерную сетку. На множестве внутренних узлов систему уравнений соответственно аппроксимируем разностной схемой [8, 9]:

$$c_{\text{эф}} T_{\bar{\tau}} + \sum_{\alpha=1}^2 A_T^{\alpha} T = \varphi_1 \quad \theta_{\bar{\tau}} + \sum_{\alpha=1}^2 A_H^{\alpha} H = \varphi_2$$

$$(W_{\bar{\tau}} + \sum_{\alpha=1}^2 A_W^{\alpha} W = \varphi_2), \quad S_{\bar{\tau}} + \sum_{\alpha=1}^2 A_S^{\alpha} S = \varphi_3,$$

где $A_T^{\alpha} = C_T^{\alpha} + D_T^{\alpha}$, $A_H^{\alpha} = D_H^{\alpha}$, $A_W^{\alpha} = D_W^{\alpha}$, $A_S^{\alpha} = C_S^{\alpha} + D_S^{\alpha}$,

$$C_T^{\alpha} T = c_{\alpha} (V_{\alpha}^{-} T_{X_{\alpha}} + V_{\alpha}^{+} T_{X_{\alpha}}),$$

$$C_S^{\alpha} S = ((V_{\alpha}^{-} \eta_2 S)_{X_{\alpha}} + (V_{\alpha}^{+} \eta_2 S)_{X_{\alpha}}),$$

$$D_T^{\alpha} T = -(\lambda_{\alpha} T_{\bar{X}_{\alpha}})_{\bar{X}_{\alpha}}, \quad D_H^{\alpha} H = -(k_{\alpha} H_{\bar{X}_{\alpha}})_{\bar{X}_{\alpha}},$$

$$D_W^{\alpha} W = -(k_{\alpha} (\eta_1 W)_{\bar{X}_{\alpha}})_{\bar{X}_{\alpha}} + \delta_{\alpha 2} (k_{\alpha})_{\bar{X}_{\alpha}},$$

$$D_S^{\alpha} S = -(D^{\alpha} (\eta_2 S)_{\bar{X}_{\alpha}})_{\bar{X}_{\alpha}} + \lambda_r S,$$

$$\varphi_1 = Li W_{\bar{\tau}}, \varphi_2 = 0, \varphi_3 = -N_{\bar{\tau}}, c_{\text{эф}} = c + L \frac{\partial W_{\text{нв}}(T)}{\partial T},$$

$$S = (W_{\text{б}} C_{\text{б}} + W_{\text{л}} C_{\text{л}}) / 100, W = W_{\text{л}} + W_{\text{б}},$$

$$W_{\text{б}} = W_{\text{нв}}(T, S), C_{\text{б}} = \eta_2 S,$$

$$V_{\alpha} = V_{\alpha}^{+} + V_{\alpha}^{-}, V_{\alpha}^{+} = 0, 5 (V_{\alpha} + |V_{\alpha}|) \geq 0,$$

$$V_{\alpha}^{-} = 0, 5 (V_{\alpha} - |V_{\alpha}|) \leq 0,$$

$$i = i(T) = W_{\text{л}} / W, \eta_1 = \eta_1(T) = 1 - i(T),$$

$$\eta_2 = \eta_2(T) = 100 / (k_{\text{л}} W_{\text{л}} + W_{\text{б}}(T)).$$

При этом следует отметить, что разностные операторы $C_{T,S}^{\alpha}$ построены с учетом знака скорости фильтрации. Через функцию количества незамерзшей воды выражаются доли порового раствора $\eta_1(T)$ и засоленности $\eta_2(T)$, которые участвуют в процессе фильтрации (диффузии). Используя вышеуказанные функции, получаем разностные операторы уравнений диффузии и примеси, которые имеют диагональное преобладание по столбцам и достаточные условия устойчивости в гильбертовом пространстве $L_{\infty}(w)$, $L_1(w)$ [9]. Численная реализация нелинейной задачи (1)–(4) осуществляется с помощью итерационных методов сквозного счета, что намного упрощает процесс решения многомерных задач тепломассообмена в мерзлых грунтах при использовании экономичных аддитивных локально-одномерных разностных схем.

3. Для численного расчета исходные данные взяты с учетом природно-климатических условий объекта «Кратон-3» (метеостанций Айхал, Удачный и Шелагонцы). При этом в качестве литологического разреза грунта использованы данные пробуренной скважины [1]. Теплофизические и массообменные характеристики мерзлых грунтов восстановлены с учетом реального про-

цесса промерзания порового раствора [3]. Для расчетов были использованы числовые значения эффективного коэффициента диффузии и параметры обмена с учетом кинетики фазового перехода в системе поровый раствор – твердая фаза, полученные различными исследователями [6, 7, 10]. Анализ данных перечисленных работ показал, что разброс значений коэффициента диффузии небольшой. При загрязнении радионуклидами происходит понижение массообменных характеристик за счет сорбции почвенно-поглощающего комплекса [10].

Самым надежным способом компаундирования радиоактивных отходов является их остеклование. Однако остеклование относится к самым дорогим способам локализации, требующим наличия специальных установок. На практике более эффективным материалом является лед, который является хорошим консервантом и аккумулятором естественного холода. Об этом свидетельствуют обнаруживаемые трупы животных, вымерших тысячелетия назад (мамонты, бизоны и т.д.), находящиеся в хорошем состоянии. Подземные льды различных типов являются специфической особенностью криолитозоны, залегают в виде обособленных тел – своеобразных мономинеральных горных пород или же составляют льдистую часть мерзлых горных пород в качестве породообразующих минералов и льда-цемента. Возраст некоторых типов льдов исчисляется тысячелетиями.

Для локализации низко- и среднерadioактивных отходов можно воспользоваться многолетней мерзлотой кургана могильника типа булгунных (якутское название). Булгуньяхи (бугры пучения), которые широко распространены на Севере, в Центральной Якутии и Канаде, относятся к инъекционным подземным льдам, формирующимся в условиях закрытой системы при промерзании замкнутых подоцерных таликов [11]. Булгуньяхи бывают разных размеров и по высоте могут достигать 40–50 м, а по основанию – несколько сотен метров. Например, в районе п. Мессоях гигантский булгуньях (возраст ≈ 8000 лет) имеет следующие параметры: длина ≈ 300 м, ширина ≈ 170 м и высота ≈ 20 м. По данным бурения и инструментальной съемки, бугры пучения имеют слоистое строение (сверху вниз):

- 1) растительный слой, кустарник;
- 2) слой оторфованного покровного суглинка и чистого льдонасыщенного торфа мощностью от 5 до 8 м;
- 3) линзообразный слой чистого льда – от 5 до 20 м;
- 4) ледогрунт – до 1,5 м;
- 5) пьедестал бугра – суглинок.

Максимальная мощность ледяного ядра булгуньяха превышает 20 м; площадь основания – 15 тыс. м²; объем – 100000 м³. Температура пород (линзы) в наиболее теплые месяцы лета колеблется от –2 до –9 °С. Криолитозона в данном районе образовалась 1,5 – 2,0 млн лет назад. Реакция мерзлых грунтов на прогнозируемое в будущем глобальное потепление в 10–30 раз меньше, чем реакция талых грунтов.

Из тепломассообменного режима основания саркофага (могильника) через 50 лет при температуре $T_{\text{ф}} = -4$ °С видно, что в январе верхний слой грунта промерзает до –10 °С (рис. а), за фронтом сезонного протаивания образуется зона повышенной влажности (рис. в), а миграции радионуклидов из-под основания могильника не наблюдается (рис. с). Институт глобального климата и экологии РАН отмечает значительное повышение зимних температур по сравнению с

летним в восточных областях России, в том числе и в Якутии. В связи с этим были рассмотрены варианты численного расчета с учетом потепления климата при различных значениях средней температуры $T_{\text{ср}}$ булгуньяха. Например, при $T_{\text{ср}} = -2^\circ\text{C}$ процесса миграции радионуклидов не наблюдается. При повышении среднегодовой температуры окружающей среды необходимую температуру (в пределах $-3 \div -9^\circ\text{C}$) кургана могильника можно будет поддерживать с помощью сезонно-охлаждающих устройств.

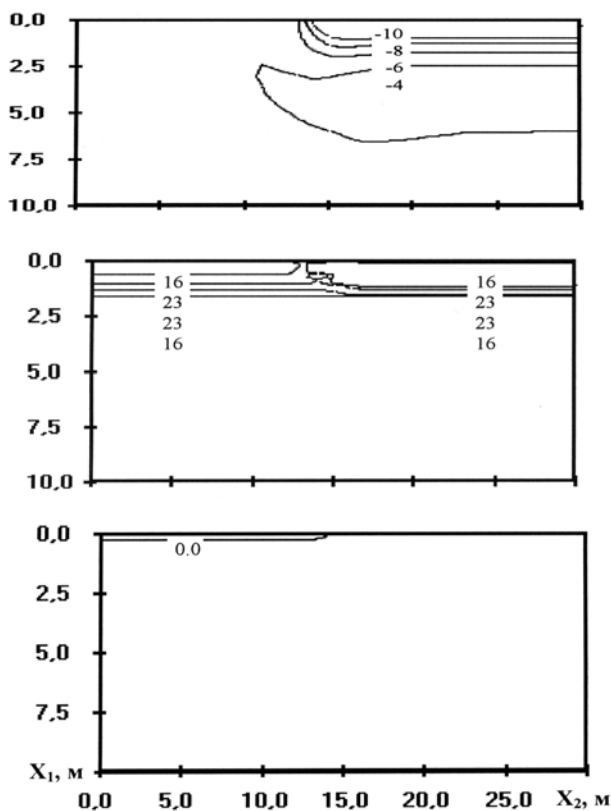


Рис. Распределения температуры (а), суммарной влажности (в) и радионуклидов (с) в грунте основания саркофага

Таким образом, локализация радионуклидов зависит от температуры курганного могильника. Среднегодовая температура кургана могильника будет находиться в пределах $-3 \div -9^\circ\text{C}$ и процесс миграции радионуклидов в мерзлой зоне минимальный.

Другим способом локализации низкорadioактивных отходов является засыпка местности дисперсными грунтами. Численный эксперимент произведен при различных температурных режимах и толщинах засыпки. Лучше всего засыпать глинистыми грунтами, так как они обладают хорошими сорбционными свойствами. Высота отсыпки должна быть выше глубины сезонного протаивания грунта ($\approx 2,0 \div 3,0$ м), чтобы загрязненный радионуклидами грунт находился в мерзлом состоянии. Насыпные работы лучше произвести в зимнее время послойным замораживанием при максимальной хладозарядке.

Для защиты от поверхностных вод, стекающих от зон экологических бедствий и чрезвычайных экологических ситуаций, должны быть сооружены: внешний кольцевой канал, рассчитанный на расход 1 % обеспеченности паводка с прилегающей водосборной; кольцевое обвалование грунтом высотой 1,5 м и шириной 3 м.

Для отвода внутренних дождевых и талых вод, стекающих с поверхности могильника, следует предусматривать пруды-испарители. Площадь пруда-испарителя определяется исходя из возможного загрязнения 10 % среднегодового расчетного стока дождевых и талых вод с поверхности могильника. На дне пруда-испарителя должен быть уложен 30-сантиметровый слой цеолитового гравия (или другие материалы, такие как мох, сланец) для сорбции радионуклидов, растворенных в воде.

Периодическое поступление и испарение загрязненной воды способствуют образованию зоны с сорбированными отходами. Численные расчеты показывают, что поглощательная способность основания пруда зависит от материала засыпки. Часть влаги, накопившаяся в «чаше протаивания» пруда, в летний период начинает мигрировать в верхние горизонты. Процесс миграции влаги усиливается с понижением температуры. Это можно сравнить с «исчезновением воды» в подполье здания при наступлении больших холодов. По мере накопления радионуклидов на дне испарительного пруда загрязненный цеолитовый гравий следует заменять новым.

Вопросом дальнейших исследований является проведение долгосрочных прогнозов миграции радионуклидов (тысяча лет) с учетом старения искусственных естественных изоляционных материалов и с применением различных сезонно-охлаждающих устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев В.В., Бурцев И.С. Ликвидация последствий аварийных подземных ядерных взрывов в зоне многолетней мерзлоты. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1999. 148 с.
2. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
3. Пермяков П.П. Идентификация параметров математической модели теплового переноса в мерзлых грунтах. Новосибирск: Наука, 1989. 86 с.
4. Ааркросс А., Дальгаард Х., Нильсен С.П., Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Юшков П.И., Трапезников А.В. Изучение вклада наиболее крупных ядерных инцидентов в радиоактивное загрязнение Уральского региона // Экология. 1998. № 1. С. 36–42.
5. Головин В.М. Новые подходы к оценке безопасности захоронений радиоактивных отходов. Информационные технологии в науке, образовании и экономике: Тез. докладов 2-й респ. научно-практической конференции. В 2 ч. Якутск: Изд-во ЯГУ, 2003. Ч. 1. С. 24–25.
6. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. М.: Энергоиздат, 1981. 97 с.
7. Батулин В.А. Вертикальная миграция радионуклидов в почве Восточно-Уральского следа и ее влияние на интенсивность исходящего излучения // Атомная энергия. 1997. Т. 82. Вып. 1. С. 44–48.
8. Пермяков П.П. Численное моделирование задач конвективно-диффузионного переноса при фазовом переходе // Проблема прочности материалов и конструкций для регионов холодного климата: Тр. I-го Евразийского симпозиума. 16–20 июля 2002 г. В 6 ч. Якутск, 2002. Ч. 4. С. 149–156.
9. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. М.: УРСС. 2003. 246 с.
10. Бровка Г.П., Дедюля И.В., Ровдан Е.Н. Экспериментальное исследование процессов миграции радионуклидов в мерзлых породах // Коллоидный журнал. 1999. Т. 61, № 6. С. 1–6.
11. Соловьев П.А. Булгуньяхи Центральной Якутии // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. М.: Изд-во АН СССР, 1952. Вып. 3. С. 226–258.

Статья представлена отделом теплофизики и теплоэнергетики Института физико-технических проблем Севера (г. Якутск), поступила в научную редакцию «Кибернетика и информатика» 20 марта 2004 г.