

ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МИГРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Г. Д. Неуважаев, Е. А. Савельева, В. С. Свительман
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2019 г.

В статье рассматривается оценка чувствительности модели переноса загрязнителя из пункта захоронения РАО в реку по сквозной трещине к фильтрационным и миграционным параметрам инженерных барьеров и геологической среды. Моделирование и оценка чувствительности выполнялись для двух разных концепций пункта захоронения. Задача оценки чувствительности формулируется как выделение набора параметров, точное знание которых позволит уменьшить неопределенность результата на 90%.

Ключевые слова: моделирование переноса, чувствительность, неопределенность, обоснование безопасности, захоронение РАО.

Введение

Важной частью процесса обоснования долговременной безопасности размещения пунктов захоронения РАО является расчетно-прогностическое моделирование. Такое моделирование направлено на получение модельных оценок выполнения функций безопасности элементами системы и осуществляется в условиях неизбежного присутствия различных типов неопределенностей [1].

Современные численные модели учитывают большое количество факторов, отвечающих за отдельные характеристики и процессы, и, соответственно, требуют задания большого количества входных параметров. Далеко не все эти параметры заранее известны с достаточной точностью, для уточнения некоторых из них требуются дополнительные полевые или лабораторные исследования, другие содержат неустранимые неопределенности в силу ограничений методов измерения или их

природной вариабельности. Тем не менее для получения результатов моделирования все параметры должны быть так или иначе заданы, причем некоторые требуют большего уровня точности. Именно поэтому особое внимание уделяется тому, что моделирование должно сопровождаться анализом чувствительности расчетной модели к изменениям ее параметров и оценкой неопределенности результата вычислений. Это отмечается как в нормативных документах [1], так и международной практикой при экспертизе обоснования безопасности объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов [2].

Анализ чувствительности позволяет многосторонне оценить влияние входных параметров на результат моделирования, что дает возможность исключать из рассмотрения при оптимизации параметров и характеристики неопределенности входные данные, не влияющие

или слабо влияющие на результат, объединять в группы параметры, влияющие скоррелированно, и так далее. Также результаты анализа чувствительности полезны при сравнении различных технических решений.

В данной работе представлен пример использования модификации вариационного подхода к анализу чувствительности для модели переноса радионуклидов в геологической среде к характеризующим ее параметрам, а также продемонстрирована значимость влияния наиболее важных параметров, принятых в модели в зависимости от технических решений по конструкции ПГЗРО.

Методика анализа чувствительности

Традиционно оценка чувствительности модели к ее параметрам используется для решения задачи в ее классической постановке, а именно ранжирование входных параметров по степени их влияния на изменение значений выходного результата [3].

Значимость параметра может также оцениваться по его вкладу в вариацию выходного результата: наиболее значимым будет тот параметр, фиксация которого на истинном значении обеспечит минимальную вариацию выходного результата. Такое понимание может быть удобно интерпретировано в задачах оценки риска в условиях ограниченности исходных данных вследствие недостаточной изученности, а именно выявляются те параметры моделей, уточнение которых позволит уменьшить вариацию (другими словами, неопределенность) результата моделирования.

Основная сложность заключается в том, что истинное значение параметра неизвестно. Тогда хорошим приближением к приведенной формулировке можно считать не фиксацию параметра на правильном значении, а рассмотрение его как математическое ожидание в некотором распределении, то есть усреднение фиксирования. Тогда наиболее значимым входным параметром будет тот, который в среднем, будучи зафиксирован, обеспечит максимальное уменьшение вариации результата.

Введем некоторые обозначения: пусть $X = \{X_i\}$, $i = 1, \dots, N$ — вектор входных параметров модели, а Y — выходной результат моделирования. Усреднение фиксирования параметра X_i по всему его распределению при вычислении вариации для каждого зафиксированного значения записывается как $E_{X_i} \{V_{X_i}(Y|X)\}$, здесь E_{X_i} — означает усреднение по различным значениям параметра X_i , V_{X_i} — означает вариацию при варьировании всех параметров, кроме X_i . Наименьшее $E_{X_i} \{V_{X_i}(Y|X)\}$ или, как следствие, наибольшее значение $V_{X_i}(E_{X_i} \{Y|X\})$ выявят именно такой фактор. То есть для решения задачи в такой постановке для некоррелированных и неавто-

действующих параметров подходит вариационный индекс чувствительности (S_i) [3]:

$$S_i = V_{X_i} (E_{X_i} \{Y | X_i\}) / V(Y), \quad (1)$$

где $V(Y)$ — полная вариация результата.

Проблема отсутствия корреляции параметров должна рассматриваться отдельно — анализ чувствительности всегда обеспечивает корректность при отсутствии корреляций. Для проверки отсутствия взаимодействий можно воспользоваться соотношением:

$$\sum_j V_j = V(Y). \quad (2)$$

При выполнении соотношения (2) все переменные можно ранжировать в зависимости от значения индекса из формулы (1), которая характеризует их вклад в вариацию выхода:

$$S_{R_1} \geq S_{R_2} \geq \dots \geq S_{R_N}, \quad (3)$$

и, соответственно, выделять наиболее значимые.

В случае когда соотношение (2) не выполнено, то мы не можем с уверенностью отобрать первые по рейтингу переменные, так как они могут участвовать в совместном эффекте, и экранировать важность других переменных. Эффект взаимодействия двух переменных описывается как

$$V_{ij} = V(E\{Y | X_i, X_j\}) - V(E\{Y | X_i\}) - V(E\{Y | X_j\}) \quad (4)$$

Аналогичные формулы можно выписать и для взаимодействий более высокого порядка, а общий вид декомпозиции вариации может выражаться в виде суммы [4, 5]:

$$V = \sum_i V_i + \sum_{i<j} V_{ij} + \sum_{i<j<m} V_{ijm} + \dots + V_{123\dots N}. \quad (5)$$

Вариационный подход к ранжированию параметров модели по их значимости реализован в различных программных средствах для оценки чувствительности SAFE [6], SimLab [7], DAKOTA [8]. Последний разработан Sandia National Laboratories (США) и рекомендуется МАГАТЭ для оценки чувствительности и неопределенности. Он также предусмотрен к реализации в рамках разрабатываемого в ИБРАЭ РАН программного комплекса для оценки чувствительности и неопределенности [9].

Но вариационный подход может быть использован для несколько модифицированной задачи, а именно: выделить те параметры модели, уточнение которых позволит уменьшить вариацию результата на заданное число процентов, например, на 90% [10]. То есть целевое значение уменьшения вариации (V_{tar}) определяется как $V_{tar}/V(Y) = 0,1$. Для случая, когда отсутствует взаимное влияние переменных, решением этой задачи будут r первых в рейтинге переменных, таких что

$$\sum_{i=1}^r V_{R_i} \geq V - V_{tar}. \quad (6)$$

Для выполнения такого анализа чувствительности, в случае отсутствия взаимодействий между переменными, может быть использован метод Морриса [11], который несет в себе оценку вариации первого порядка, то есть аппарат для вычисления V_i .

Но в общем случае этого недостаточно, и для решения такой задачи необходимо последовательно оценить сначала вклад каждой из переменных, затем эффекты взаимодействия пар, затем эффекты взаимодействия триплетов и так далее. Одним из наиболее общих вариантов решения этой задачи состоит в использовании индексов Соболя, которые являются именно оценками вариации для наборов групп переменных [4, 5].

Для проведения вычислений предлагается алгоритм, использующий полный индекс чувствительности модели к параметру. Полный индекс (V_T) является частью суммы (5), элементы которой содержат члены, относящиеся к этому параметру X_i , и определяется как средняя вариация результата в условиях неопределенности этого параметра ($E\{V(Y|X_{-i})\}$). Процедура выбора параметров, уточнение которых позволит уменьшить вариацию результата на 90%, выполняется следующим образом:

- 1) Вычисляется полный набор индексов $V_i, i = 1, \dots, N$ и $V_{T_i}, i = 1, \dots, N$.
- 2) Переменные ранжируются в соответствии со значениями V_{T_i} , так что получается последовательность $V_{T_{R1}} > V_{T_{R2}} > \dots > V_{T_{RN}}$.
- 3) Выбирается параметр с наивысшим рейтингом общего индекса ($R1$). Если $V_{R1} > V - V_{tar}$ то задача решена – точное знание параметра X_{R1} уменьшит вариацию выхода на 90%. Если нет, то процедура продолжается переходом к шагу 4.
- 4) Выбирается параметр со вторым по рейтингу общим индексом ($R2$), если $V_{R1} + V_{R2} + V_{R1R2} > V - V_{tar}$ то выбираются параметры X_{R1} и X_{R2} . Если нет – процедура продолжается.
- 5) Выбирается параметр со следующим по рейтингу общим индексом ($X_{T_{Rk}}$). Вычисляем все парные вариации $V_{R_i, R_k}, i = 1, \dots, k - 1$, вариации триплетов $V_{R_i, R_j, R_k}, i, j = 1, \dots, k - 1, i \neq j$ и вариации более высоких порядков до порядка $k(V_{R_1, \dots, R_k}^c)$. Если

$$\sum_{j=1}^k V_{R_j} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k V_{R_i, R_j} + \sum_{\substack{i,j,m=1 \\ i \neq j \neq m}}^k V_{R_i, R_j, R_m} + \dots + V_{R_1, \dots, R_k} > V - V_{tar},$$

то к имеющемуся набору добавляется $X_{T_{Rk}}$, и процедура завершается. Если нет – повторяется шаг 5.

Далее демонстрируется применение описанного подхода к задаче моделирования переноса радионуклидов в геологической среде.

Описание моделей и варьируемых параметров

При скважинном размещении контейнеров с радиоактивными отходами возможны различные варианты технических решений по конструкции скважин, и в данной статье рассматриваются два различных варианта: «проходных» и «тупиковых» скважин. Границы модели приведены на рис. 1. Проходными скважинами называются те, которые соединяют горизонтальные выработки на двух рабочих уровнях (рис. 2), а тупиковые изолированы породой со стороны горизонтальной выработки (рис. 3). Предполагается, что вертикальные скважины диаметром 1,3 м и глубиной 75 м будут расположены на расстоянии 15 м друг от друга и в них будет размещено по 18 изолирующих контейнеров, содержащих РАО. Результатом моделирования является оценка количества условного загрязнителя, поступившего в реку за время 10 000 лет.

Расчетная область для случая проходных скважин состоит из 18 скважин и 2 тоннелей, рядом с которыми проходит трещина до реки (рис. 2), в случае тупиковыми скважинами рассматривались 1 тоннель и 18 скважин, трещина обозначена красным цветом (рис. 3).

Градиент напора оценивался по двум скважинам, расстояние между которыми составляло 2000 м, а перепад напоров 50 м, в результате градиент составил 0,025. Диапазоны изменения параметров (таблица 1) были определены с



Рис. 1. Границы модели

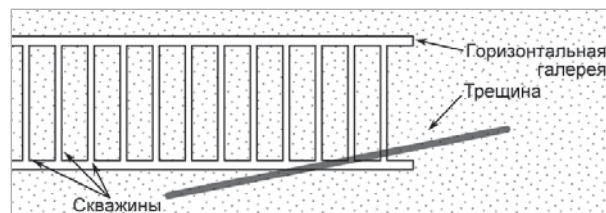


Рис. 2. Схема проходных скважин

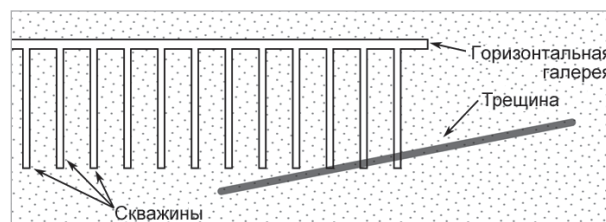


Рис. 3. Схема тупиковых скважин

учетом неоднородности массива из следующих соображений.

- Диапазон для коэффициентов фильтрации горных пород в естественном сложении выбирался на основании определений, выполненных при проведении геологических изысканий [12].
- Для коэффициента фильтрации горных пород в трещинах использовался широкий диапазон в связи с тем, что зачастую при изучении геологических свойств массива трудно дать оценку фильтрационным свойствам для трещин, т. к. они могут быть как водопроницаемыми, так и заполненными материалом.
- Диапазон варьирования коэффициента фильтрации горизонтальных галерей с техногенной трещиноватостью был выбран исходя из следующего. Для проходки горизонтальной галереи будут проводиться буровзрывные работы, при таких условиях могут возникать трещины. В сложившейся гидрогеологической обстановке именно по этим возможным трещинам будет происходить водопиток.
- Диапазон коэффициента фильтрации вертикальных скважин был определен исходя из

свойств горного массива, условий проходки и инженерных барьеров безопасности, применяемых для упаковок.

- Коэффициенты пористости были выбраны на основе литературных данных, а также на основании работы [12] и экспертной оценки.

Моделирование процессов фильтрации и переноса было выполнено при помощи кода GeRa [13]. ПК GeRa представляет собой программу для трехмерных расчетов нестационарных изотермических задач фильтрации и многокомпонентного переноса в неоднородных и, возможно, анизотропных геологических средах. В соответствии с аттестационным паспортом GeRa обеспечивает проведение прогнозных и эпигнозных расчетов гидрогеологической и гидрогеохимической обстановки в локальном или региональном масштабе.

Задача фильтрации решалась в стационарной напорной постановке. Для расчета массопереноса была принята начальная концентрация загрязнителя в каждой скважине, равная 1, в качестве пессимистического варианта был принят несорбируемый загрязнитель.

Таблица 1. Варьируемые параметры модели

Параметр	Описание	Диапазоны значений
Kf_rock [м/сут]	Коэффициент фильтрации горных пород в естественном сложении	0,00001–0,0048
Kf_tun [м/сут]	Коэффициент фильтрации горизонтальных галерей с техногенной трещиноватостью (тоннель)	0,01–0,3
Kf_bor [м/сут]	Коэффициент фильтрации вертикальных скважин с упаковками РАО	0,001–0,1
Kf_fract [м/сут]	Коэффициент фильтрации горных пород в трещинах	0,0002–0,3
Por_rock	Средняя активная пористость горных пород	0,33 % (0,3–1 %)
Por_tun	Активная пористость горных пород в зоне техногенной трещиноватости	5 % (1–20 %)
Por_bor	Активная пористость горных пород в вертикальных скважинах	1 % (0,5–1,5 %)
Por_fract	Пористость горных пород в трещинах	1 % (0,1–5 %)

Результаты анализа чувствительности

Анализ чувствительности проводился по описанной выше методике с использованием индексов Соболя для относительного количества загрязнителя, поступившего к границе модели на момент 10 000 лет. Индексы Соболя первого порядка V_p , второго порядка V_{ip} , и общие V_T вычислялись при помощи библиотеки SALib [14] на языке Python 2.7. Процедура анализа осуществлялась на основании результатов, приведенных в таблицах 2–5 (индексы отсортированы по убыванию, нулевые и близкие к нулю индексы второго порядка не приводятся), и состояла из следующих шагов.

- Проверка исследуемых моделей на аддитивность: для обеих моделей соотношение (2) не выполняется, модели не аддитивны.

- Ранжирование параметров:

- для модели с проходными скважинами наибольший рейтинг общего индекса у параметров коэффициентов фильтрации скважин, горизонтальных галерей и породы в естественном сложении Kf_bor, Kf_tun, Kf_rock;

- для модели с тупиковыми скважинами наибольший вклад вносят коэффициенты фильтрации породы естественного сложения, трещин и горизонтальных галерей Kf_rock, Kf_fract, Kf_tun.

- Выбор параметров, позволяющих уменьшить вариацию на 80%:

- для модели концепции проходных скважин вклада параметра с наибольшим индексом первого порядка (коэффициент фильтрации для породы естественного сложения Kf_rock) достаточно для уменьшения вариации на 80% (таблица 3).

– для модели с тупиковыми скважинами одного параметра недостаточно, из таблицы 4 видно, что наибольший вклад вносят Kf_rock и Kf_fract, а из таблицы 5 видно, что их совместного вклада достаточно для искомого уменьшения вариации результата.

Таким образом, было получено, что для проходных скважин наиболее влияющим на неопределенность результата является коэффициент фильтрации породы в естественном сложении, а для модели концепции тупиковых скважин необходимо также учитывать значимость влияния коэффициента фильтрации трещин.

Таблица 2. Вариация результата и ее уменьшение на 80%

Модель с проходными скважинами		Модель с тупиковыми скважинами	
V	$9,17 \cdot 10^{-2}$	V	$35,42 \cdot 10^{-2}$
$V - V_{tar} (80\%)$	$7,33 \cdot 10^{-2}$	$V - V_{tar} (80\%)$	$28,34 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3. Индексы первого порядка по убыванию

Модель с проходными скважинами		Модель с тупиковыми скважинами	
X_{Ri} (параметр)	V_{Ri}	X_{Ri} (параметр)	V_{Ri}
Kf_rock	$8,22 \cdot 10^{-2}$	Kf_rock	$18,99 \cdot 10^{-2}$
Kf_fract	$1,11 \cdot 10^{-3}$	Por_rock	$4,86 \cdot 10^{-3}$
Por_rock	$8,31 \cdot 10^{-4}$	Por_fract	$2,89 \cdot 10^{-3}$
Por_fract	$2,4 \cdot 10^{-5}$	Por_bor	$2,74 \cdot 10^{-3}$
Por_bor	$1,64 \cdot 10^{-5}$	Kf_bor	$2,71 \cdot 10^{-3}$
Por_tun	0	Kf_tun	$1,60 \cdot 10^{-3}$
Kf_bor	0	Kf_fract	$9,31 \cdot 10^{-4}$
Kf_tun	0	Por_tun	0
$\sum_i V_{Ri}$	$8,42 \cdot 10^{-2}$	$\sum_i V_{Ri}$	$20,56 \cdot 10^{-2}$

Заключение

Для эффективного учета неопределенностей, без которого невозможно полноценное рассмотрение проблем безопасного захоронения радиоактивных отходов, и включения получаемых оценок распространения загрязнения в обоснование безопасности важно понимать, какие из параметров вносят более значимый вклад в вариацию результата.

В данной статье продемонстрировано применение вариационного метода анализа чувствительности в процессе моделирования переноса загрязнения в геологической среде. Такой анализ позволил сделать выводы о том,

Таблица 4. Общие индексы по убыванию

Модель с проходными скважинами		Модель с тупиковыми скважинами	
X (параметр)	V	X (параметр)	V
Kf_tun	$7,42 \cdot 10^{-1}$	Kf_rock	1,02
Kf_bor	$7,10 \cdot 10^{-1}$	Kf_fract	$5,76 \cdot 10^{-1}$
Kf_rock	$3,52 \cdot 10^{-1}$	Por_tun	$4,19 \cdot 10^{-1}$
Kf_fract	$1,57 \cdot 10^{-1}$	Kf_tun	$2,72 \cdot 10^{-1}$
Por_rock	$1,25 \cdot 10^{-2}$	Por_rock	$2,59 \cdot 10^{-1}$
Por_bor	$2,05 \cdot 10^{-5}$	Kf_bor	$2,12 \cdot 10^{-1}$
Por_fract	$1,80 \cdot 10^{-5}$	Por_fract	$2,10 \cdot 10^{-1}$
Por_tun	$2,21 \cdot 10^{-6}$	Por_bor	$2,10 \cdot 10^{-1}$
$\sum_i V_{TRi}$	1,97	$\sum_i V_{TRi}$	3,18

Таблица 5. Индексы второго порядка по убыванию

Модель с проходными скважинами			Модель с тупиковыми скважинами		
X_j (параметр)	X_m (параметр)	V_{jm}	X_j (параметр)	X_m (параметр)	V_{jm}
Kf_rock	Kf_fract	$4,90 \cdot 10^{-2}$	Kf_rock	Kf_fract	$4,43 \cdot 10^{-1}$
Kf_rock	Por_rock	$3,52 \cdot 10^{-2}$	Kf_rock	Por_rock	$1,44 \cdot 10^{-1}$
Kf_rock	Por_tun	$3,10 \cdot 10^{-2}$	Kf_rock	Por_bor	$1,18 \cdot 10^{-1}$
Kf_rock	Por_fract	$3,00 \cdot 10^{-2}$	Kf_rock	Por_tun	$1,16 \cdot 10^{-1}$
Kf_rock	Por_bor	$3,00 \cdot 10^{-2}$	Kf_rock	Por_fract	$1,15 \cdot 10^{-1}$
Kf_tun	Kf_rock	$2,43 \cdot 10^{-2}$	Kf_tun	Kf_rock	$9,58 \cdot 10^{-2}$
Kf_bor	Por_rock	$7,63 \cdot 10^{-3}$	Kf_bor	Kf_rock	$1,34 \cdot 10^{-2}$
...					

уточнение таких параметров при дальнейших исследованиях позволит в наибольшей степени уменьшить неопределенность результата моделирования.

Также проведение анализа чувствительности позволяет заключить, что в зависимости от конструкторских решений ПГЗРО, наиболее важными оказались параметры, характеризующие различные элементы геологической среды. Это лишний раз подтверждает, что концепция системы глубинного захоронения влияет на набор наиболее приоритетных исследований.

Модели для анализа безопасности пунктов захоронения РАО

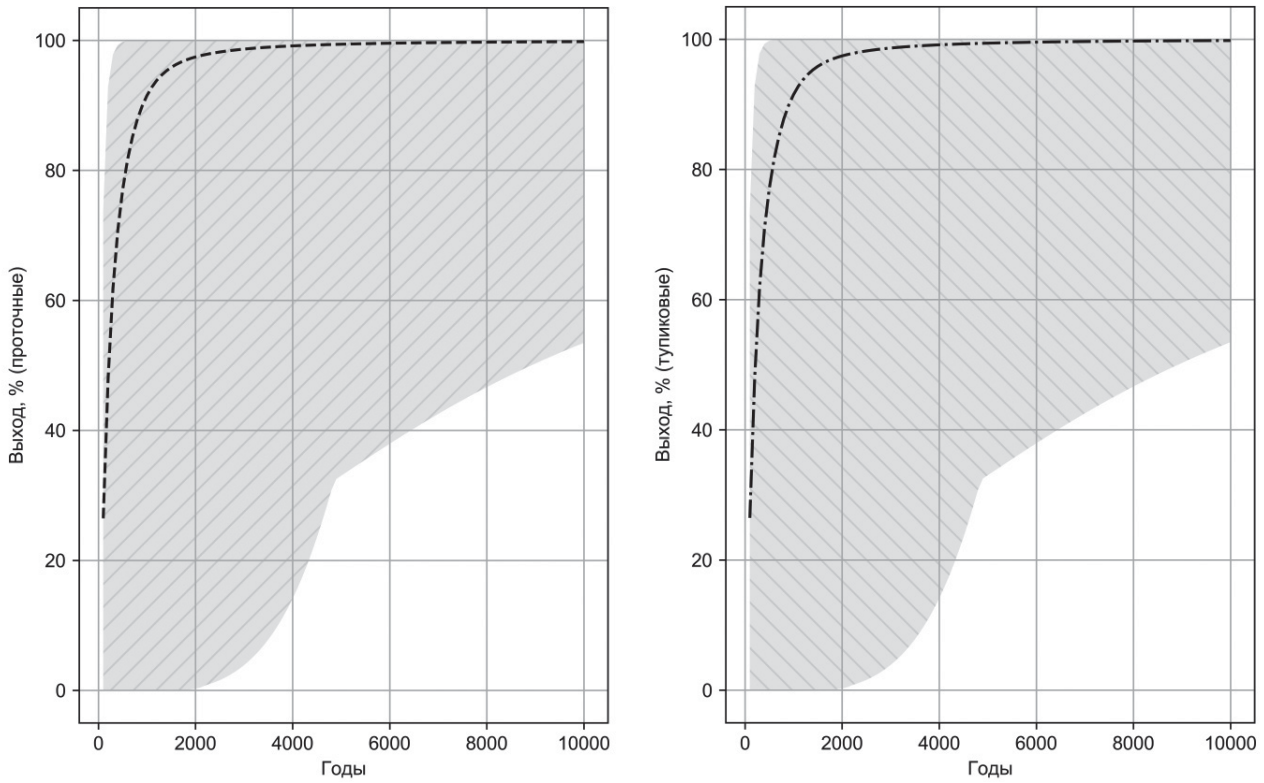


Рис. 4а. Разброс зависимости от времени доли загрязнения, попавшего в реку, при первоначальном диапазоне параметров

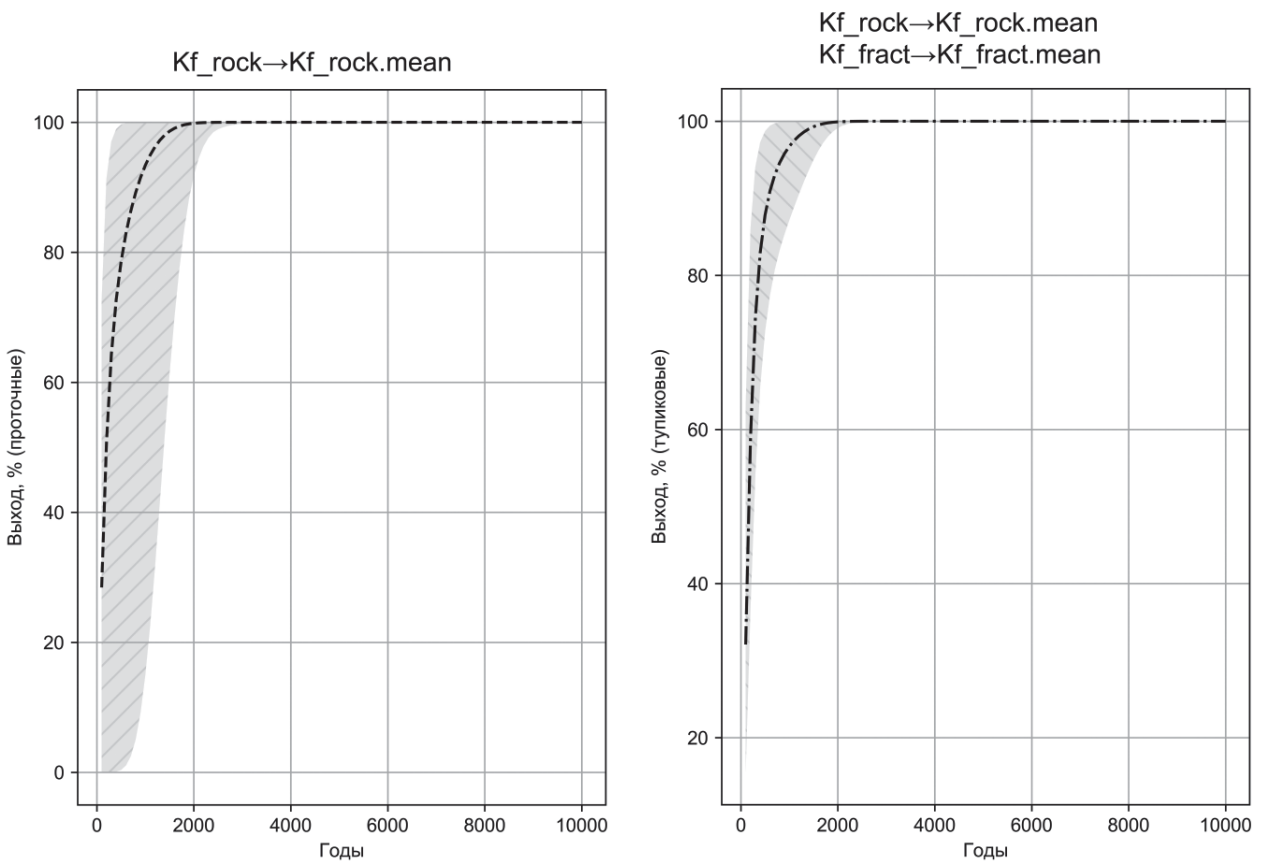


Рисунок 4б. Разброс зависимости от времени доли загрязнения, попавшего в реку, при фиксированных наиболее значимых параметрах

Литература

1. Савельева Е. А., Свительман В. С. Методология и практические решения обращения с неопределенностями при обосновании безопасности пунктов захоронения РАО // Вопросы радиационной безопасности. 2016. Вып. 2 № 2. С. 3–14.
2. Линге И. И. и др. Опыт применения международных требований по обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: проблемы и уроки // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 208–213.
3. Saltelli A. et al. Global sensitivity analysis: the primer. — John Wiley & Sons, 2008.
4. Соболев И. М. Об оценке чувствительности нелинейных математических моделей // Математическое моделирование. 1990. Т. 2. № 1. С. 112–118.
5. Sobol I. M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates // Mathematics and computers in simulation. 2001. Т. 55. № 1–3. С. 271–280.
6. Pianosi F., Sarrazin F., & Wagener T. (2015). A Matlab toolbox for global sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*, 70, 80–85.
7. Saltelli A. et al. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. — John Wiley & Sons, 2004.
8. DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.6 User's Manual, SAND 2014-4633, 2014
9. Савельева Е. А. Концепция программного комплекса для оценки неопределенности при обосновании безопасности пунктов захоронения РАО. // Ядерная и радиационная безопасность, 2016, №4 (82).
10. Saltelli A., Tarantola S. On relative importance of input factors in mathematical models: the case of Level E // Joint Research Centre of the European Communities in ISPRA. — 2002.
11. Morris M. D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments // *Technometrics*. 1991. Т. 33. № 2. С. 161–174.
12. Озерский А. Ю. Отчет «Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском массиве (участок «Енисейский»)». / А. Ю. Озерский, К. А. Заблоцкий. — Красноярск, ОАО «Красноярскгеология», 2011
13. Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения РАО / И. В. Капырин [и др.] // Горный журнал. 2015. № 10. С. 44–50.
14. Herman J., Usher W. SALib: an open-source Python library for sensitivity analysis // *The Journal of Open Source Software*. 2017. Т. 2. № 9.

Информация об авторах

Неуважаев Георгий Дмитриевич, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: neuvazhaev@ibrae.ac.ru

Савельева Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией №13 Геостатистического моделирования, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: esav@ibrae.ac.ru

Свительман Валентина Семеновна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: svitelman@ibrae.ac.ru

Библиографическое описание статьи

Неуважаев Г. Д., Савельева Е. А., Свительман В. С. Вариационный метод оценки чувствительности миграционной модели // Радиоактивные отходы. 2019. № 1(6). С. 69–76.

VARIATION APPROACH TO SENSITIVITY ASSESSMENT OF A MIGRATION MODEL

Neuvazhaev G. D., Saveleva E. A., Svitelman V. S.

Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia

Article received 12 February 2019

The article deals with the sensitivity assessment of the migration model to the filtration and migration parameters of engineering barriers and geological environment. The pollutant starts from the radioactive waste disposal facility and moves in the direction of the river through the crack. Modeling and sensitivity assessment were performed for two different concepts of the disposal facility. The problem of sensitivity assessment is formulated as a selection of a set of parameters, the exact knowledge of which will reduce the uncertainty of the result of modeling by 90%.

Key words: pollutant transfer modelling, sensitivity, uncertainties, safety assessment, radioactive waste disposal.

References

1. Savelieva E. A., Svitelman V. S. Methodology and practical solutions given the uncertainty in justifying the safety of disposal sites for radioactive waste. *Issues of radiation safety*, 2016, vol. 2, no 2, p. 3–14. (In Russian).
2. Linge I. I., et al. Experience in applying international requirements for justifying the long-term safety of radioactive waste disposal sites: problems and lessons. *Atomic Energy*, 2016, vol. 120, no. 4, p. 208–213. (In Russian).
3. Saltelli A. et al. Global sensitivity analysis: the primer. – John Wiley & Sons, 2008.
4. Sobol I. M. On the sensitivity assessment of non-linear mathematical models. *Mathematical modeling*, 1990, vol. 2, no. 1, p. 112–118. (In Russian).
5. Sobol I. M. Global sensitivity indices for non-linear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and computers in simulation*, 2001, vol. 55, no. 1–3, p. 271–280.
6. Pianosi F., Sarrazin F., & Wagener T. (2015). A Matlab toolbox for global sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*, 70, 80–85.
7. Saltelli A. et al. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. – John Wiley & Sons, 2004.
8. DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.6 User’s Manual, SAND2014-4633, 2014
9. Savelyeva E. A. The concept of a software package for estimating uncertainty in justifying the safety of disposal sites for radioactive waste. *Nuclear and Radiation Safety*, 2016, no. 4 (82). (In Russian).
10. Saltelli A., Tarantola S. On relative importance of input factors in mathematical models: the case of Level E. Joint Research Centre of the European Communities in ISPRA. – 2002.
11. Morris M. D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 1991, vol. 33, no. 2, p. 161–174.
12. Ozersky A. Yu., Zablotsky K. A. The report “Geological studies (assessment stage) of the object of final isolation of radioactive waste in the Lower Kansky massif (area “Yenisei)”. Krasnoyarsk, Krasnoyarskgeology OJSC, 2011. (In Russian).
13. Integral code GeRa to justify the safety of disposal of radioactive waste I. V. Kapyrin [and others]. *Mining Journal*, 2015, vol. 10, p. 44–50. (In Russian).
14. Herman J., Usher W. SALib: an open-source Python library for sensitivity analysis. *The Journal of Open Source Software*, 2017, vol. 2, no. 9.

Information about authors

Neuvazhaev Georgiy Dmitrievich, Junior research associate, Nuclear Safety Institute of RAS (115191, Moscow, Bolshaya Tuskaya St., 52), e-mail: neyvazhaev@ibrae.ac.ru

Saveleva Elena Aleksandrovna, PhD, Head of laboratory no. 13 Geostatistical modeling, Nuclear Safety Institute of RAS (115191, Moscow, Bolshaya Tuskaya St., 52), e-mail: esav@ibrae.ac.ru

Svitelman Valentina Semenovna, PhD, Research associate, Nuclear Safety Institute of RAS (115191, Moscow, Bolshaya Tuskaya St., 52), e-mail:svitelman@ibrae.ac.ru

Bibliographic description

Neuvazhaev G. D., Saveleva E. A., Svitelman V. S. Variation Approach to Sensitivity Assessment of a Migration Model. *Radioactive Waste*, 2019, no. 1(6), pp. 69–76. (In Russian).