

Вероятностные модели распространения загрязнений в крупных водных акваториях. Статистики и стохастические вычислительные алгоритмы

О. С. Сороковикова*^{†‡}, Д. В. Дзама*,
Д. Г. Асфандияров*, Д. В. Благодатских*

* *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
ул. Большая Тульская, д.52, Москва, Россия, 115191*

[†] *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ,
Студгородок, д.1, Калужская область, г. Обнинск, Россия, 249040*

[‡] *Московский физико-технический институт,
Институтский пер., д.9, Московская область, г. Долгопрудный, Россия,
141701*

Аннотация. Представляется версия модели Монте-Карло для расчета распространения загрязнения в крупной водной акватории с детальным учетом береговой линии. На основе многолетней базы данных о течениях, глубинах верхнего квазиоднородного слоя перемешивания предлагается вероятностная модель районирования водных акваторий по уровню загрязнений. Предлагается версия распараллеливания расчетов по модели Монте-Карло с разными вариантами датчиков псевдослучайных величин. Проведено сравнение эффективности нескольких вариантов таких датчиков для параллельных вычислений. Предлагаемая методика расчета разных статистик загрязнения планируется к применению для объектов ядерного наследия в виде крупных природно-техногенных водных комплексов.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, модель переноса примеси в океане, датчики псевдослучайных величин, параллельные вычисления.

1. Введение

Актуальность решения задачи переноса радионуклидов в поверхностных водных объектах, загрязненных радиоактивными веществами, включая приоритетность обоснования и разработки научно-технического инструментария для прогнозирования состояния крупных хранилищ ЖРО, отмечалась не единожды [1–3].

Экспертная оценка, проведенная в ИБРАЭ РАН, показала, что факты превышения предельно-допустимых концентраций радионуклидов могут наблюдаться на расстояниях десятков и сотен километров от места нахождения источника загрязнения [4]. Кроме того, в работе [4] был сделан вывод о важности учета различных особенностей среды, в частности межгодовой изменчивости течений, для расчета переноса примеси на дальние расстояния.

В международной практике существует опыт учета влияния изменений атмосферных процессов (3D нестационарной метеорологии) на распространение загрязнения при моделировании с помощью

лагранжевой стохастической модели [5, 6] различных сценариев длительных (порядка нескольких месяцев) выбросов радиоактивных веществ в атмосферу. Изменчивость атмосферных течений учитывалась посредством проведения серии расчетов с одинаковой функцией источника, но с использованием различных временных рядов метеопараметров [6]. На основе проведенных расчетов в каждой точке расчетной области была произведена оценка максимального уровня загрязнения, если начало выброса приходится на любой момент времени за последние пять лет.

В отличие от баз данных по атмосферным течениям многолетние базы данных по морским течениям стали появляться в открытом доступе относительно недавно. Эти базы данных основываются как на расчетах, сделанных по совместным динамическим моделям атмосферы и океана, так и с использованием 4D-Var ассимиляции данных. В данной работе представлена вероятностная модель, которая разрабатывается в рамках создания практической методологии районирования акваторий с наиболее высоким уровнем загрязнения в случае возникновения условий для ускоренного распространения и/или перераспределения радиоактивного загрязнения на объектах ядерного наследия – крупных природно-техногенных водных комплексах.

2. Основная часть

В основе использованной методики лежит использование численной модели на основе метода Монте-Карло для расчетов поверхностного загрязнения, учитывающей процессы адвекции, диффузии, с использованием неточечных частиц специального вида. Предполагается, что смещение центра каждой частицы находится с помощью численного решения уравнения Ито методом Монте-Карло. Таким образом, производится учет как адвективного переноса, так и крупномасштабных турбулентных процессов.

Вертикальный размер этих частиц ограничен глубиной слоя перемешивания, при этом внутри каждой частицы распределение концентрации примеси по вертикали равномерно. Размер частиц по горизонтали меняется за счет процессов мелкомасштабной диффузии. Концентрация примеси в частице может также уменьшаться за счет процессов даунвеллинга.

При проведении расчетов учитываются взаимодействие примеси с береговой линией, которая задается с разрешением в 90 метров [7, 8]. В качестве базы данных по морским течениям берутся расчеты, сделанные по результатам измерений, сделанными в ходе измерительной кампании JCOPE (Japan Coastal Ocean Predictable Experiment) [9] и охватывают временной период с 1993 по 2009 годы.

На рис. 1 показаны результаты расчетов за 1993 и 2007 годы с началом выброса 15 января и длительностью в три месяца с одинаковыми параметрами источника.

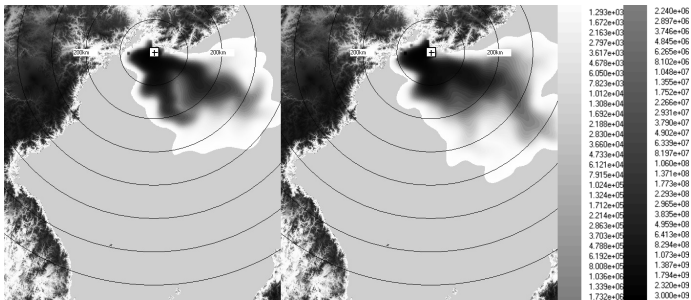


Рис. 1. Пример расчетов для гипотетического выброса за разные годы

В виду того, что проведение ансамблевых расчетов требует задействования значительных вычислительных ресурсов, расчеты по вышеупомянутой численной модели проводились с использованием технологии параллельных вычислений. В основе предложенного способа распараллеливания лежит разбиение исходной задачи на определенное число подзадач для которых расчет проводится в течение всего периода действия источника, но с меньшим числом частиц обратно пропорциональным количеству решаемых подзадач.

Предложенный способ обеспечивает практически равномерную загрузку процессоров. Однако при этом необходимо обеспечить независимость рассчитываемых траекторий частиц в разных процессах, чтобы гарантировать хорошую статистическую обеспеченность получаемых результатов.

Для достижения высокой степени независимости хаотических смещений частиц в разных процессах необходимо использовать генераторы псевдослучайных чисел (ГПСЧ) большой цикличности. В качестве эффективных генераторов рассматривался РПСЧ разработанный в ИБРАЭ РАН, и 128-битный генератор Дядькина-Хэмилтона [10].

В ходе проведения корреляционного анализа генератор Дядькина-Хэмилтона продемонстрировал, согласно нескольким статистическим критериям, большую статистическую независимость генерируемых им подпоследовательностей псевдослучайных чисел и был выбран в качестве основного ГПСЧ, применяемого в расчетах.

В основе вероятностной модели, используемой в данной работе, лежит проведение серии расчетов с фиксированным временем действия источника, но с произвольным временем начала выброса. На основе проведенных таким образом расчетов, в каждой точке рассматриваемой акватории строится вариационный ряд для величин, характеризующих уровня загрязнения. На основе данного вариационного ряда

строится функция распределения искомых величин. Для анализа полученных результатов разработана программная процедура, отфильтровывающая редкие события с высокими значениями концентрации загрязнения с заданным пользователем уровнем доверия.

3. Заключение

На примере расчетов гипотетического выброса показано, что закономерности распространения загрязнения в акватории могут носить устойчивый характер. Таким образом, практическая ценность полученных результатов заключается в том, что анализ выявленных с помощью разрабатываемой вероятностной модели закономерностей может быть в дальнейшем использован для организации оптимальной стратегии взятия проб для береговых объектов ядерного наследия с учетом межсезонной изменчивости океанических течений.

Литература

1. *Под общей редакцией Большова Л. А., Лаверова Н. П., Линге И. И.* ГЛАВА 4. Реализация программных мероприятий по решению проблемы накопленных РАО // Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Развитие системы обращения с радиоактивными отходами в России. — Т. 2. — М.: Энергопроаналитика, 2013.
2. *Саркисов А. А., Сивинцев Ю. В., Высокый В. Л., Никитин В. С.* Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей — Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. Москва, 2015. — 699 с.
3. *Уткин С. С.* Обоснование решений по долговременной безопасности крупных хранилищ жидких радиоактивных отходов: дис. докт. техн. наук: 05.14.03: защищена 12.10.2016. — М., 2016. — 233 с.
4. *Семенов В. Н., Сороковиков А. В., Сороковикова О. С.* Консервативные модельные оценки загрязнения поверхностных вод при возникновении экстремальных гипотетических аварий при утилизации подводных лодок на Камчатском полуострове // Труды ИБРАЭ РАН. — 2008. — Вып. 9. — С. 202–229.
5. *Sofiev A., Siljamo P.* A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data // *Atm. Env.* — 2006. — Vol. 40. — P. 674–685.
6. Environmental Impact Assessment Report. New Nuclear Power Plant in Lithuania // Lithuanian Energy Institute (Lithuania), Pojuy Energy Oy (Finland), August 27th, 2008.
7. Сайт NASA [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> — свободный.
8. Сайт NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [Электронный ресурс] Режим доступа:

<https://www.ngdc.noaa.gov/docucomp/page?xml=NOAA/NESDIS/NGDC/MGG/DEM/iso/xml/316.xml&view=getDataView&header=pone> — свободный.

9. Сайт APDRC (Asia-Pacific Data-Research center) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/frajscore2.php> — свободный.
10. *Marchenko M. A., Mikhailov G. A.* Parallel realization of statistical simulation and random number generators // Russ. J. Number. Anal. Math. Modelling. — 2002. — Vol. 17, no. 1. — P. 113–124.

UDC 519.248:53

Probabilistic models of contamination in large water areas. Statistics and stochastic algorithms

O. S. Sorokovikova*^{†‡}, D. V. Dzama*, D. G. Asfandiyarov*,
D. V. Blagodatskikh*

* *The Nuclear Safety Institute,
The Russian Academy of Sciences,
Bolshaya Tulkaya str. 52, Moscow, 115191, Russia*

[†] *The Moscow Engineering Physics Institute,
Studgorodok 1, Obninsk, Moscow region, 249040, Russia*

[‡] *The Moscow Institute of Physics and Technology,
Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia*

A version of Monte-Carlo model for simulation of contamination in a large water area taking into account the detailed shape of the coastline is presented. Utilizing a multi-year database of sea currents, the depth of the mixed layer a probabilistic model of contamination level zoning of water areas has been proposed. A version of parallelization of calculations by Monte-Carlo model using various pseudorandom number generators has been proposed. The comparative efficiency of a few variants of such generators with regard to parallel calculations has been considered. The proposed methodology for calculation of various statistics of contamination is intended to be applied for objects of nuclear heritage categorized as large natural and technogenic water areas.

Keywords: Monte-Carlo method, ocean dispersion model, pseudorandom number generators, parallel calculations.