

УДК 004.9:504:519.6

РАСЧЕТ ПЛАНЕТАРНОГО ПЕРЕНОСА РАДИОНУКЛИДОВ ПОСЛЕ АВАРИИ НА АЭС ФУКУСИМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ MATCH СИСТЕМЫ RODOS

С.Н. Дидковская, Е.А. Евдин, И.В. Ковалец, М.И. Железняк

Институт проблем математических машин и систем НАН Украины

e-mail: sveta@ucewp.kiev.ua

Введение. Опыт преодоления последствий аварии на АЭС Фукусима еще раз ярко продемонстрировал необходимость использования автоматизированных систем поддержки принятия решений для оценки распространения радиоактивного выброса в воздушной и водной среде на основе оперативных данных численного прогноза погоды (ЧПП). Наиболее известным примером такой системы является система ядерного аварийного реагирования Евросоюза RODOS, разрабатываемая с 1991 года по сегодняшний день [1], [2], и установленная в кризисных аварийных центрах многих европейских стран. Во время аварии на АЭС Фукусима 11 марта 2011 г, система RODOS, как и некоторые другие системы, например, американская система NARAC, была в короткие сроки адаптирована для производства оперативного прогноза распространения загрязнения в случае выброса в окружающую среду [3],[4],[5]. Оперативные прогнозы распространения радионуклидов производились этими системами только в ближней зоне размером до 300 км от атомной станции. Тем не менее, вскоре после аварии, особенно после 14 марта 2011 г, когда появились сообщения о плавлении активной зоны, стал ясен глобальный характер этой катастрофы, а к началу апреля 2011 г превышение радиационного фона за счет аварии было зарегистрировано и на Украине. Поэтому возникла необходимость расчета глобального атмосферного переноса радионуклидов. Во время аварии система РОДОС оказалась не до конца готовой к решению такой задачи. Это было связано с тем, что модель глобального переноса радионуклидов MATCH, входящая в систему РОДОС, корректно работала только на данных ЧПП модели Датского метеорологического института HIRLAM. Поэтому одним из приоритетов разработки системы RODOS после аварии на АЭС Фукусима стало создание возможности запуска модели глобального переноса MATCH на общедоступных данных ЧПП, свободно распространяющихся через сервера NOMADS [6] и/или рассчитанных моделью WRF.

Подготовка данных ЧПП для MATCH. Чтобы создать возможность запуска MATCH на собственном наборе данных ЧПП необходимо привести эти данные в соответствие данным модели HIRLAM: 1) проинтерполировать данные ЧПП по вертикали на уровни модели HIRLAM; 2) пересчитать из имеющегося набора метеорологических параметров те параметры, которые выдает HIRLAM; 3) записать данные в формате Всемирной метеорологической организации GRIB. Ранее подобная задача была решена в период адаптации системы RODOS для Украины в 2001 г, когда MATCH был запущен на результатах модели MM5. В настоящее время созданы программные средства подготовки данных ЧПП для MATCH на основе выходных данных мезомасштабной модели WRF (в формате NETCDF) и на основе данных глобальной модели ЧПП GFS, доступных на серверах NOMADS. Созданные программные средства будут включены в одно из будущих обновлений системы RODOS.

Тестирование расчетов MATCH на основе данных WRF и GFS проводилось следующим образом. Вначале были проведены расчеты WRF в ближней зоне, на расстояниях до 400 км от АЭС Фукусима, на сетке с пространственным разрешением 0.15 градуса (около 15 км). На основании данных WRF были проведены расчеты распространения моделью MATCH и хорошо отлаженной цепочкой моделей атмосферного переноса в ближней зоне (LSMC) системы RODOS. Сравнение результатов обоих расчетов показало хорошее совпадение как формы облака, так и точечных значений

інтегральної концентрації в повітрі, які для Cs-137 співпали з точністю около 10%. Правда, осажені концентрації по результатам обох моделей отличались в 2 рази, що об'яснимо розличиями в параметризації сухого осадження.

На наступному етапі порівнювались результати MATCH, розраховані на основі даних WRF, і результати, розраховані на основі даних моделі GFS (ці ж дані GFS використовувались в розрахунках WRF для задання граничних і початкових умов). Из-за розличия просторового розрешення обох моделей (0.15 градуса для WRF і 1 градус моделі GFS) точні порівняння оказались неможливі. Однак, як напрямлення розповсюдження, так і інтегральна по часу і по області концентрація в приземному шарі повітря по результатам розрахунків обох моделей співпадали з хорошою точністю. Таким чином, проведене тестування підтвердило коректність підготовки даних ЧПР для MATCH.

Результати розрахунків. Моделювання планетарного переносу радіонуклідів після аварії на АЕС Фукусіма проводилось на основі даних фінального аналізу (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>), який використовується для ініціалізації моделі GFS. Ці дані надаються з розрешенням 1 градус і покривають весь Земний шар. Суммарне кількість викиду Cs-137 задавалось рівним $2.6 \cdot 10^{16}$ Бк, що є компромісною оцінкою між менше консервативною оцінкою ($1.2 \cdot 10^{16}$ Бк) японського Агентства ядерної і промислової безпеки (NISA) і більш консервативними оцінками ($2.1 \cdot 10^{16} - 5.31 \cdot 10^{16}$ Бк), отриманими на основі рішення оберненої задачі в роботі [7]. Викид починався 14 березня 2011 г в 0 ч і закінчився через 48 ч. Висота викиду задавалась рівною 50 м.

На рис. 3 показані просторові розподіли миттєвої концентрації Cs-137 в приземному шарі (показана тільки частина розподілу поблизу США). На рис. 3 (зліва, 19 березня 2011 г) хорошо виражений фронт хмари, орієнтованого в основному з заходу на схід з невеликою меридіональною складовою. Таке розподілення знаходиться в близькому відповідності з розрахунками інших моделей [8]. Згадаємо, що саме 18-19 березня були зафіксовані перші ознаки перевищення фонових концентрацій радіонуклідів у берегах США, що передбачається і моделлю (концентрації у берегах досягають значень 0.1 мБк/м^3). При наближенні до берегової лінії відбувається швидке розмивання хмари в меридіональному напрямку, як це видно з рис. 3 (справа, 24 березня 2011 г). Ця особливість також знаходиться в близькому згоді з розрахунками інших моделей [8] і, можливо, пов'язана з інтенсифікацією вихреобразования західніше США під впливом Кордильєр. Згадаємо, що модель також виробляє яскраво виражений локальний максимум концентрації в Каліфорнії, зафіксований також і вимірами. Утворення ж другого максимуму поблизу Сіетла суперечить вимірам.

Кількісну оцінку моделювання з вимірами зручніше виробляти на основі порівняння з вимірами інтегрального осадження, оскільки по порівнянню з вимірами миттєвих концентрацій, виміри осадження менш чутливі до неминувим локальним помилкам в параметрах задачі (поле вітру, тимчасове розподілення характеристик джерела). Розраховане розподілення інтегрального осадження Cs-137 по всій території північного півкуль за період з 14 по 29 березня 2011 г показано на рис. 2. Модель передбачає середнє значення осаженої концентрації на рівні 30 Бк/м^2 вздовж всього західного узбережжя США. При цьому на межі штатів Каліфорнія і Орегон досягається максимальне значення осаженої концентрації 90 Бк/м^2 . Дані вимірів, приведені в [9] свідчать про те, що найбільші виміри концентрації на західному узбережжя США досягаються на території штату Каліфорнія (4 виміри з значеннями 240, 37, 30 і 7 Бк/м^2). На решті території західного узбережжя є тільки 2 виміри – в Сіетлі (7.1

Бк/м²) и в северной части штата Орегон (4.5 Бк/м²). Таким образом, модель в целом верно воспроизводит загрязнение штата Калифорния и существенно завышает осаждение в северной части западного побережья США. Модель также предсказывает второй локальный максимум загрязнения 60 Бк/м² на территории штата Юта. В работе [9] измерения на территории этого штата не проводились, но можно предположить, что из-за достаточно грубого шага сетки (1 градус) и недооценки влияния Кордильер на блокирование облака, модель может предсказывать более глубокое проникание фронта загрязнения на территории США. В целом же значения осаждения, рассчитанные моделью для восточной части США, находятся на уровне ~1 Бк/м², что в целом согласуется с измерениями.

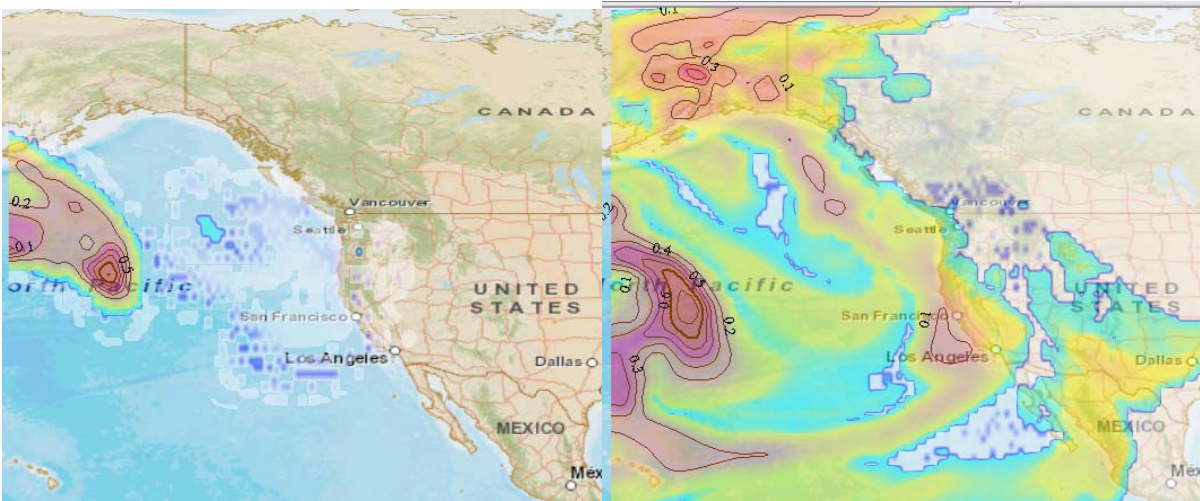


Рис. 3. Мгновенные концентрации Cs-137 (Бк/м³), рассчитанные моделью MATCH возле США 19-го (слева) и 24-го марта 2011 г.

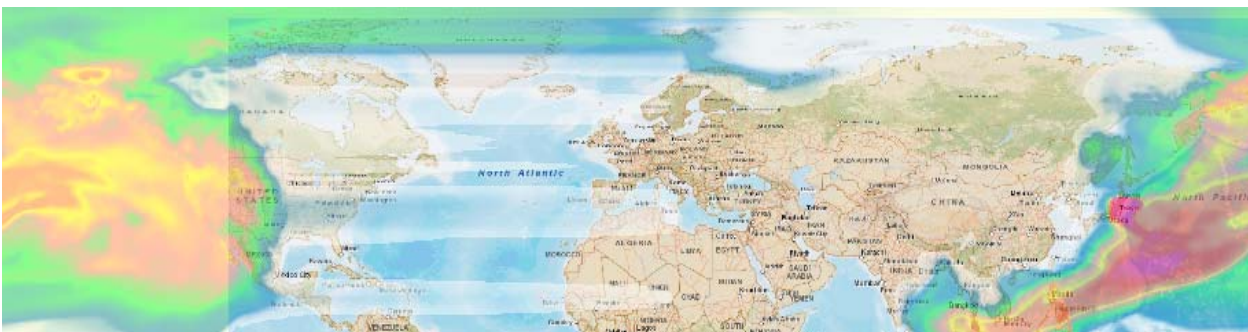


Рис. 4. Плотности выпадений Cs-137 (Бк/м²), рассчитанные моделью MATCH для 29-го марта 2011 г; цветная шкала соответствует значениям: 1 (голубой), 10 (зеленый), 30 (розовый), 70 (желтый), 100 (оранжевый), 500 (красный), >1000 (темно-красный).

Отметим, что из-за ограничений версии MATCH, интегрированной в RODOS, в настоящей работе не удалось досчитать распространение загрязнения на восток далее 265 долготы. Поэтому в работе не представлены результаты расчетов для территории Украины. Однако авторы надеются устранить имеющиеся ограничения во взаимодействии с авторами MATCH.

Выводы. В работе впервые представлены оценки глобального распространения радионуклидов после аварии на АЭС Фукусима, полученные с помощью системы RODOS. Для расчетов использовалась модель дальнего переноса MATCH этой системы. Разработаны программные средства, позволяющие запускать эту модель в системе

RODOS, используя свободно распространяемые данные ЧПП модели GFS, а также данные расчетов модели WRF.

Результаты расчетов на качественном уровне согласуются с результатами других моделей и с измерениями. Количественное сравнение рассчитанных осажденных концентраций Cs-137 с измерениями, проведенными на территории США показало хорошее согласование рассчитанных значений с измерениями на территории штата Калифорния и в центральной части США. Модель существенно завышает интегральное осаждение в северной части западного побережья. Имеющиеся различия могут быть связаны: 1) со сделанными предположениями относительно временного распределения характеристик источника; 2) недостаточным учетом Кордильер на распространение радионуклидов из-за грубой сетки исходных метеоданных (1 градус).

Существующие ограничения версии MATCH в системе RODOS не позволили досчитать распространение загрязнения до территории Украины, однако авторы надеются устранить имеющиеся ограничения во взаимодействии с авторами MATCH.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что модель MATCH в сочетании со свободно распространяемыми данными ЧПП модели GFS (или данными WRF) может применяться на практике для оценок последствий дальнего переноса радионуклидов вследствие аварийных выбросов.

Литература

1. Raskob W., 2007. European approach to nuclear and radiological emergency management and rehabilitation strategies (EURANOS). *Kerntechnik* 72 (4) (2007) 172-175.
2. Ievdin Ie, Trybushnyi D., Zheleznyak M., Raskob W. RODOS re-engineering: aims and implementation details. *Radioprotection* 2010, Vol. 45, n° 5, p. 181–189.
3. Sugiyama, G., Nasstrom, J. Pobanz, B. Foster, K. Simpson, M. Vogt, P. Aluzzi, F. Homann, S., 2011. Atmospheric Dispersion Modeling: Challenges of the Fukushima Daiichi Response. *Health Physics*. – 2012. – Vol. 102, N. 5. – P. 493–508
4. Евдин Е.А., Трибушный Д.М., Ковалец И.В., Халченков А.В., Железняк М.И., 2011. Многоплатформенная версия системы поддержки принятия решений РОДОС и ее адаптация для оценки последствий воздушных выбросов на АЭС Фукусима. Сб. Тр. 9-й международной научно-практической конференции по проблемам атомной энергетики – Режим доступа: (<http://icnpe.com.ua/category/2011/stati/>)
5. Raskob W., et.al., 2011. Application of the Terrestrial and Aquatic Models of JRODOS for the Fukushima Accident. *Proc. of Int. Conf. on Radioecology and Environmental Radioactivity ICRER'2011*, Canada, Ontario, Hamilton, 19-24 June, 2011.
6. Rutledge G., 2006. NOMADS – a climate and weather model archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration / G. Rutledge, J. Alpert, W. Ebusizaki // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2006. – Vol. 87. – P. 327–341.
7. Stohl A., et.al., 2011. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 2313–2343.
8. Takemura T., et.al., 2011. A Numerical Simulation of Global Transport of Atmospheric Particles Emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *SOLA*, 2011, Vol. 7, 101–104. – Режим доступа: (https://www.jstage.jst.go.jp/article/sola/7/0/7_0_101/_pdf)
9. Wetherbee, G.A., Debey, T.M., Nilles, M.A., Lehmann, C.M.B., and Gay, D.A., 2012, Fission products in National Atmospheric Deposition Program—Wet deposition samples prior to and following the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant incident, March 8–April 5, 2011: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1277, 27 p.