

Н. Н. Талерко, Д. В. Жигинас, А. Г. Кузьменко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ ПО ДАННЫМ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Исследована применимость метода решения обратной задачи атмосферного переноса, использующего расширенный фильтр Калмана, для восстановления параметров аварийного выброса из ЧАЭС на основе данных измерений мощности экспозиционной дозы (МЭД), проведенных в г. Припять с 26 по 29 апреля 1986 г. Реконструированы значения суточных выбросов радионуклидов, а также метеорологических параметров в начальный период аварии. Получено, что сходимость метода существенно зависит от качества исходных данных измерений МЭД, а также выбора начальных значений итерационного процесса расчетов по методу фильтра Калмана. Показано, что по мере накопления радиоактивных выпадений на поверхности земли в течение рассматриваемого периода сходимость стандартного метода фильтра Калмана может ухудшаться. Предложена модификация алгоритма для улучшения сходимости при сильно зашумленных данных, позволяющая добиться сходимости метода при большой неопределенности первоначальной оценки параметров источника.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, моделирование атмосферного переноса, мощность экспозиционной дозы, реконструкция параметров источника выброса, фильтр Калмана.

Введение

Моделирование распространения загрязняющих примесей в атмосфере (в том числе радиоактивных выбросов из ядерно-радиационных объектов) широко используется для оценки влияния выбросов на окружающую среду и здоровье человека. В общем случае достоверность таких оценок определяется следующими основными факторами:

1. Детальностью описания физических процессов переноса нуклидов в атмосфере и их осаждения на подстилающую поверхность (параметризация турбулентной диффузии, скорости седиментации аэрозольных частиц, интенсивности сухого и влажного осаждения примеси и т.п.) в самой модели.

2. Качеством и полнотой входной метеорологической информации, используемой для расчетов - ее пространственным разрешением, учетом нестационарности метеорологических процессов.

3. Детализацией характеристик источника выбросов - его интенсивности, эффективной высоты выброса, фазового и химического (нуклидного) состава, размеров частиц в случае аэрозольного выброса и др.

4. Учетом влияния свойств подстилающей поверхности на распространение и осаждение примеси – рельефа, пространственной неоднородности параметра шероховатости земной поверхности.

В зависимости от конкретной задачи, решаемой с помощью моделирования атмосферного переноса примеси, относительное влияние каждого из указанных факторов на величину неопределенности результатов расчетов может быть разным. Для проблемы оперативного прогнозирования последствий выбросов из объектов атомной энергетики в случае радиационной аварии наиболее критичным оказывается оценка характеристик источника выбросов, в первую очередь его интенсивности. Как показывает опыт всех крупных радиационных аварий, включая Чернобыльскую и Фукусимскую, неопределенность первых оценок выброса могла достигать нескольких порядков величины. По мере накопления данных измерений радиационной ситуации в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению, оценки основных характеристик источника выбросов постепенно уточнялись. В условиях неполноты и неизбежной несогласованности поступающих данных измерений, что характерно для аварийной ситуации, процедура оценки параметра источника выброса по данным измерений на местности оказывается достаточно сложной задачей. Для ее решения предложено и интенсивно разрабатываются различные математические методы, обзоры которых можно найти в [1 - 4].

В последние годы для реконструкции параметров источника широкое применение получил метод, основанный на использовании фильтра Калмана [6, 7], который оценивает вектор состояния динамической системы на основе данных неполных и зашумленных измерений. Применимость фильтра Калмана к реконструкции параметров источника тестировалась на данных численных экспериментов по моделированию распространения радиоактивного выброса [8] и результатах диффузионного эксперимента Kincaid [9] (с использованием значений концентрации примеси в воздухе). В [10]

© Н. Н. Талерко, Д. В. Жигинас, А. Г. Кузьменко, 2018

приведены результаты тестирования метода с использованием модельных значений мощности экспозиционной дозы (МЭД) при выбросе одного нуклида, а в [11, 12] – по данным измерений МЭД при диффузионном эксперименте на исследовательском реакторе с выбросом ^{41}Ar .

Ранее в [5] при решении обратной задачи атмосферного распространения радионуклидов с использованием метода минимакса была проведена реконструкция параметров выброса из Чернобыльской АЭС в начальный период аварии на основе данных измерений МЭД, проведенных в г. Припять в течение 26 - 29 апреля 1986 г. В настоящей работе приведены результаты исследования применимости метода оценки параметров выброса, использующего фильтр Калмана, для решения этой задачи по тем же данным измерений.

Описание метода

Фильтр Калмана применяется для оценки состояния динамической системы по данным измерений. Состояние системы описывается вектором $X = (x_1, \dots, x_m)$, где x_i – значения отдельных параметров источника выброса, а также метеорологических характеристик, определяющих распространение выброса в атмосфере. Оценка параметров системы производится по данным измерений на местности, определяемой вектором $Y = (y_1, \dots, y_n)$ (n – количество измерений).

В методе предполагается, что вектор измерений (наблюдаемых величин) Y связан с вектором оценки параметров системы X линейным уравнением и в наблюдении присутствует погрешность, некоррелированная с оцениваемыми параметрами

$$Y = HX + \varepsilon, \quad (1)$$

где ε – вектор погрешности измерений с ковариационной матрицей R , а H – матрица, описывающая связь наблюдаемых величин Y с набором оцениваемых параметров системы X .

Обычный фильтр Калмана предполагает линейную зависимость между указанными векторами, и по этой причине он неприменим к большинству задач реконструкции параметров источника выбросов в атмосферу. Для общего случая их нелинейной связи

$$Y = h(X) + \varepsilon \quad (2)$$

используется расширенный фильтр Калмана (extended Kalman filter, EKF). Он предусматривает последовательную линеаризацию функции $h(X)$ в окрестности значений X на каждом шаге расчетов, т.е. вычисляется матрица $H_{ij} = \frac{\partial h_i}{\partial x_j}$, где i – номер измерения, а j – номер оцениваемого параметра.

Эволюция вектора состояния X в процессе применения фильтра Калмана в общем случае описывается уравнением

$$X_k = MX_{k-1} + \eta, \quad (3)$$

где слагаемое η описывает изменение параметров системы под влиянием случайных процессов в ней («белый шум») с ковариационной матрицей Q , а M – оператор прогноза изменения параметров системы. Индексы k и $k - 1$ обозначают номера шагов в итерационном процессе вычислений. Поскольку в рассматриваемой задаче состояние системы (параметры источника выброса и метеорологические параметры) предполагается квазистационарным (в пределах каждого выбранного временного интервала), то значение M далее полагается равным $M \equiv 1$.

Вычисления с помощью фильтра Калмана могут быть описаны такими уравнениями:

$$X_k^f = MX_{k-1}, \quad (4)$$

$$P_k^f = MP_{k-1}M^T + Q, \quad (5)$$

$$K = P^f H^T (HP^f H^T + R)^{-1}, \quad (6)$$

$$X^a = X^f + K(Y - HX^f), \quad (7)$$

$$P^a = (I - KH)P^f, \quad (8)$$

где P – ковариационная матрица ошибки прогноза; K – коэффициент усиления фильтра Калмана; I – единичная матрица.

Алгоритм работает в два этапа – прогнозирования (значения с индексом f) и коррекции (значения с индексом a). На этапе прогнозирования фильтр Калмана экстраполирует значения переменных состояния (уравнение (4)), а также их неопределенности (уравнение (5)). На втором этапе (уравнения (6) - (8)), по данным измерения, полученного с некоторой погрешностью, результат экстрапо-

ляции уточняется. В результате итерационный процесс, направленный на достижение максимально возможной сходимости наборов расчетных и измеренных значений, дает оптимальную оценку значений параметров системы.

Постановка задачи реконструкции параметров источника

В данной работе для восстановления параметров аварийного выброса из ЧАЭС использованы данные измерений и исходные предположения, использованные в [5], поэтому здесь ограничимся лишь их кратким изложением.

Набор исходных данных измерений включал результаты 485 измерений МЭД, проводившихся сотрудниками ЧАЭС в период с 03 ч 26 по 23 ч 29 апреля 1986 г. в 31 точке в г. Припять [13] (рис. 1). Максимальные значения МЭД за весь период измерений варьировались от 290 мР/ч в северо-западной части до 1404 мР/ч в восточной части города.



Рис. 1. План г. Припять с точками расположения пунктов измерений МЭД. Стрелкой показано направление на ЧАЭС. Выделены зоны города с различным уровнем радиоактивного загрязнения.

Для расчетов атмосферного переноса радионуклидов и их осаждения на земную поверхность использована стационарная гауссова модель струи [14]. Для описания меняющейся во времени картины формирования поля радиоактивного загрязнения рассматриваемый период (26 - 29 апреля 1986 г.) разбивался на интервалы, в течение каждого из которых предполагалась стационарность параметров источника и метеорологических условий распространения выброса. На основании анализа данных измерений МЭД и имеющихся метеорологической информации были выделены интервалы, в течение которых радиоактивные выбросы из ЧАЭС переносились в направлении г. Припять (табл. 1).

Таблица 1. Периоды переноса радиоактивного выброса из ЧАЭС в направлении г. Припять (апрель 1986 г.)

Период	Дата	Время, ч	Скорость ветра U , м/с	Класс устойчивости атмосферы	Длительность переноса на г. Припять, ч
A	26.04.86	18 – 22	6	D	4
B	26.04.86	22 – 02 (27.04)	2	D	4
C	27.04.86	05 – 07	2	D	2
D	27.04.86	08 – 13	2	C	5
E	27.04.86	13 – 18	2	C	5
F	27.04.86	21 – 23	4	D	2
G	28.04.86	12 – 19	3	C	7
H	29.04.86	15 – 24	2	D	9

Имеющиеся данные метеонаблюдений в этот период не могут быть использованы для задания направления ветра в модельных расчетах вследствие влияния локальных особенностей формирования метеоусловий и большой периодичности проведения измерений. Поэтому, как и в [5], направление ветра рассматривалось как параметр, требующий своего определения в рамках решения обратной задачи атмосферного переноса.

Дальнейшие расчеты проводились для 19 основных гамма-излучающих нуклидов, соотношение которых в выбросе принималось постоянным [5]. В 31 точке измерений рассчитывалась динамика во времени объемной активности каждого радионуклида, их плотности выпадений (с учетом различной скорости сухого осаждения), вклада в значения МЭД от воздушной компоненты и от выпадений, а также суммарное значение МЭД.

Результаты для двухпараметрической задачи

Для тестирования алгоритма с использованием фильтра Калмана рассматривалась 2-параметрическая задача, в которой вектор параметров системы X (уравнение (1)) включал интенсивность выброса q и направление ветра 2 при фиксированном значении эффективной высоты выброса. В качестве вектора измерений Y использовался набор измерений МЭД по всем пунктам в течение выбранного периода. Оценка оптимальных значений q и 2 проводилась последовательно для каждого из 8 периодов, указанных в табл. 1. После нахождения их оптимальной оценки для очередного периода рассчитанные на момент его окончания значения объемной активности радионуклидов, плотности их выпадений и МЭД использовались как начальные при аналогичных оценках для последующего периода из табл. 1. В течение временных интервалов, когда перенос на г. Припять отсутствовал, учитывались самоочищение приземного воздуха за счет постепенного осаждения примеси на земную поверхность и радиоактивный распад нуклидов.

Процедура оптимальной оценки значений q и 2 проводилась независимо для четырех значений эффективной высоты выброса $H = 50, 100, 200$ и 300 м. Полученные результаты для направления ветра и интенсивности выброса ^{137}Cs представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты восстановления интенсивности аварийного выброса из ЧАЭС и направления ветра для каждого выбранного периода

Номер периода	Интенсивность выброса q (^{137}Cs), ТБк/ч				Направление ветра 2 , град			
	$H = 50$ м	$H = 100$ м	$H = 200$ м	$H = 300$ м	$H = 50$ м	$H = 100$ м	$H = 200$ м	$H = 300$ м
A	40	46	86	255	138	138	139	142
B	58	68	123	350	145	145	146	147
C	29	31	46	83	116	116	116	116
D	84	87	104	141	128	128	128	129
E	43	44	53	70	131	132	133	135
F	115	140	313	1498	146	146	148	150
G	169	203	441	1802	155	155	156	159
H	187	223	455	1645	164	164	164	165

В табл. 2 указаны значения направления ветра, принятого в метеорологии, т.е. $2 = 90^\circ$ соответствует переносу выброса на запад, а $2 = 180^\circ$ - на север. Для источника выброса, расположенного в начале координат, точки измерений МЭД в г. Припять расположены в секторе 111° (западная часть) $< 2 < 138^\circ$ (восточная часть города). Согласно результатам реконструкции, метеорологические условия, определявшие радиоактивное загрязнение г. Припять в течение начального периода аварии, существенно менялись. Юго-восточный ветер в течение вечера 26 - ночи 27 апреля обусловил начало интенсивного радиоактивного загрязнения города, прежде всего его восточной части (зоны 6 - 8 на рис. 1). С раннего утра и до полудня 27 апреля выброс из ЧАЭС распространялся в направлении г. Припять, что обусловило интенсивный рост значений МЭД по всей территории города. Во второй половине 27 апреля направление переноса начало меняться по часовой стрелке на северо-северо-западное, и в последующий период значительное увеличение величины МЭД фиксировалось снова

преимущественно в восточной части города. Расхождения в оценках направления ветра, полученные для разных значений эффективной высоты выброса, не превышают 4°.

В отличие от значений направления ветра результаты оценок интенсивности выброса значительно отличаются между собой в зависимости от выбора эффективной высоты выброса (см. табл. 2). Это объясняется сильной корреляцией между значениями интенсивности источника и его высоты [12].

В табл. 3 приведены статистические характеристики сравнения модельных C_i и измеренных M_i значений МЭД по всему массиву измерений ($N = 485$): S – значение функции стоимости, полученное в результате нахождения оптимальной оценки параметров; $\sigma = \frac{1}{N \cdot \bar{M} \cdot \bar{C}} \sum_{i=1}^N (M_i - C_i)^2$ – относительное среднеквадратичное отклонение; $FOEX = (N_{(C_i > M_i)} / N - 0.5) \cdot 100\%$ – доля завышенных модельных значений по сравнению с измеренными; $FA\alpha = (N_{(M_i / \alpha \leq C_i \leq \alpha M_i)} / N) \cdot 100\%$ – доля пар измеренных и модельных значений, отношение которых не превышает α ; G – среднее геометрическое набора пар C_i/M_i ; σ_G – геометрическое стандартное отклонение набора пар C_i/M_i ; r – коэффициент корреляции Пирсона.

Таблица 3. Статистические характеристики сравнения измеренных и модельных значений МЭД для разных значений эффективной высоты выброса (485 пар значений)

Статистические характеристики	Эффективная высота выброса H , м			
	50	100	200	300
S , (мР/ч) ²	6,28 10 ⁶	6,45 10 ⁶	7,19 10 ⁶	9,02 10 ⁶
σ	0,097	0,099	0,111	0,141
FOEX	10,8	11,4	11,4	9,2
FA2	88,2	88,0	86,8	84,7
FA3	96,9	96,7	96,5	94,8
FA5	99,2	99,2	99,2	99,4
G	1,09	1,09	1,09	1,07
σ_G	1,24	1,24	1,25	1,28
r	0,92	0,92	0,91	0,89

Как видно по большинству статистических характеристик из табл. 3, наилучшая оценка двух параметров задачи при заданной высоте выброса может быть получена для значения $H = 50$ м. Интерполируя по времени рассчитанные для этого варианта результаты оценки интенсивности источника для каждого из периодов переноса выброса на г. Припять (см. табл. 2), можно оценить значения суточных выбросов из ЧАЭС. Для ¹³⁷Cs они равны 1,0 ПБк для 26 апреля, 1,8 ПБк для 27 апреля, 4,1 ПБк для 28 апреля и 4,5 ПБк для 29 апреля (что составляет 3, 18, 56 и 91 % от общепринятых значений [15] соответственно).

Таким образом, оценки интенсивности чернобыльского выброса, полученные при решении двухпараметрической задачи с фиксированной высотой выброса, значительно занижают эту величину в начальный период аварии (26 – 27 апреля 1986 г.). Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, в этот период эффективная высота выброса достигала 1000 м и более, поэтому для более достоверных оценок величина H также должна включаться в число реконструируемых параметров задачи наряду с интенсивностью выброса. Во-вторых, фактические данные измерений, полученные лишь на ограниченной площади на расстоянии 2 - 4 км от источника, полностью не отображают сложные процессы распространения выброса от такого высотного источника (для этого требуется привлечение данных измерений на больших расстояниях). В более поздний период выброса по мере снижения эффективной высоты источника погрешность оценок выброса, связанная с этим фактором, уменьшается. В-третьих, интерполяция полученных оценок интенсивности выброса на временные промежутки, в которых основное направление переноса выброса уходило в сторону от г. Припять, также вносит значительную погрешность в рассчитанные значения суточных выбросов (особенно это касается первых 17 часов после аварии). С учетом этих обстоятельств оценки интенсивности источника в течение 28 - 29 апреля 1986 г. могут рассматриваться как вполне удовлетворительные.

На рис. 2 приведены примеры результатов расчетов МЭД для разных зон загрязнения города с использованием значений интенсивности выброса и направления ветра, реконструированных для каждого из 8 периодов с заданной высотой источника $H = 50$ м.

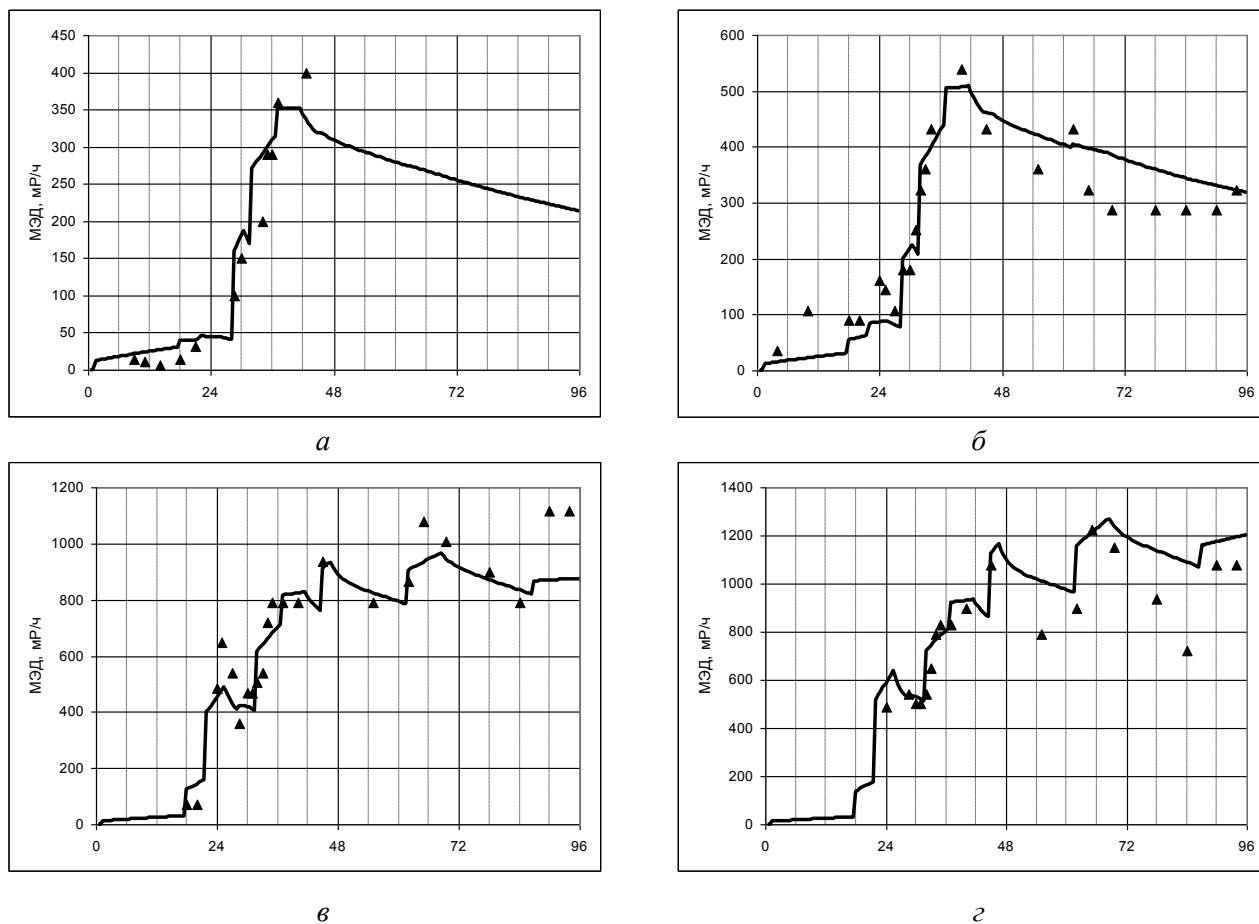
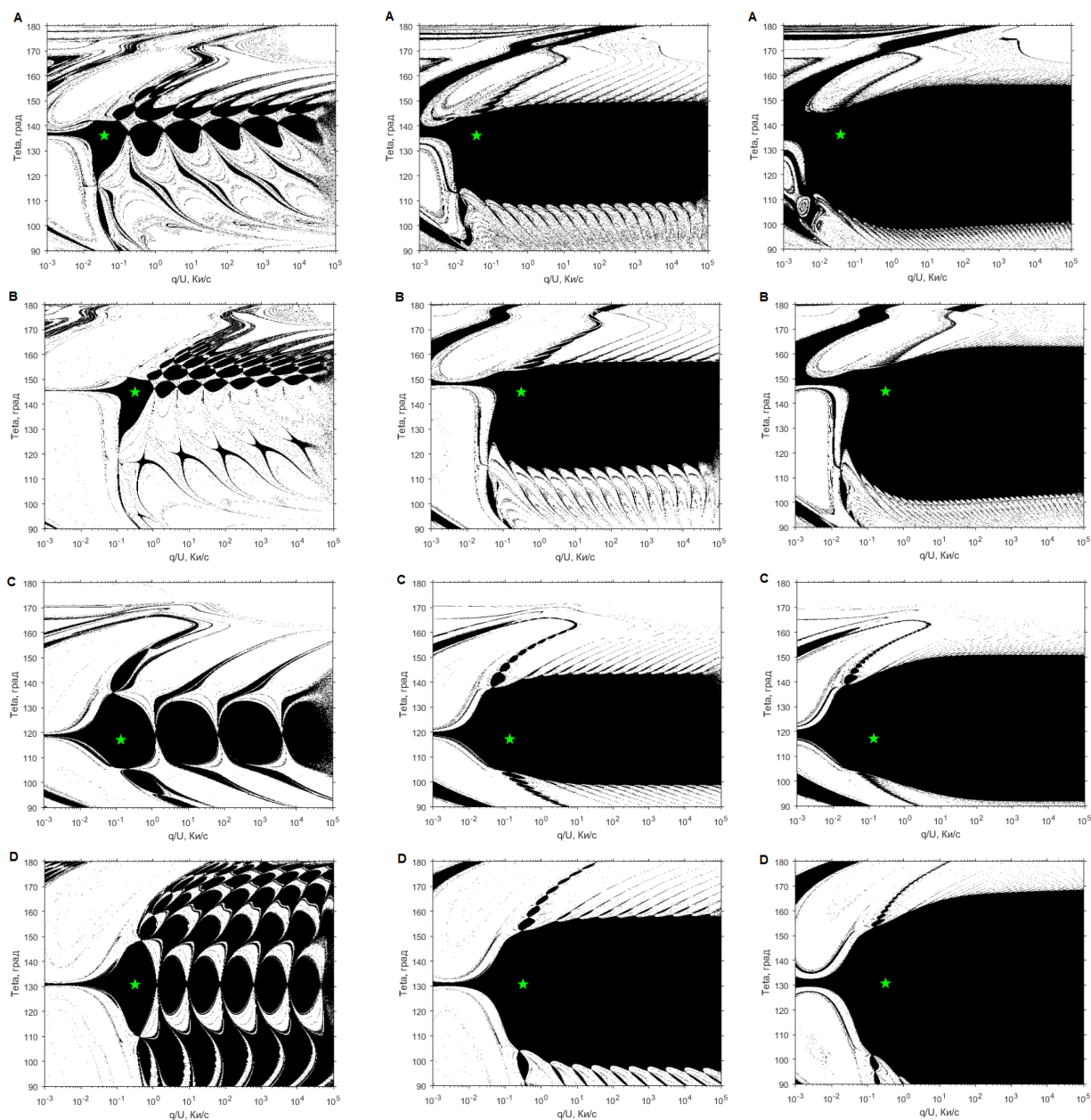


Рис. 2. Динамика изменения МЭД во времени для точек измерений № 3 (а), 16 (б), 19.3 (в) и 19.4 (г): линии – расчетные значения; треугольники – результаты измерений. По оси x - время в часах после 0 ч 26 апреля 1986 г.

Оценка сходимости алгоритма

В [4] отмечена работа по реконструкции параметров источника радиоактивных выбросов, в которой использование расширенного фильтра Калмана приводило к расходимости численного решения. Известно, что сходимость алгоритма поиска оптимальной оценки параметров с помощью любого из методов нелинейной оптимизации, в том числе фильтра Калмана, в значительной степени зависит от выбора начального приближения для их значений [3]. В связи с этим было проведено исследование сходимости метода для рассматриваемой задачи. Для каждого из 8 заданных временных периодов была проведена процедура поиска оптимальной оценки интенсивности выброса радионуклидов (в качестве «реперного» нуклида был выбран ^{137}Cs) и направления ветра для различных значений их начального приближения. Начальные значения оценки направления ветра выбирались в пределах $90^\circ < 2_0 < 180^\circ$ с шагом $0,1^\circ$. Для удобства вычислений в качестве второго оцениваемого параметра использовалась интенсивность выброса ^{137}Cs в Ки/с, деленная на скорость ветра U (м/с), которая задавалась для каждого периода согласно табл. 1. Для определенной таким образом величины q/U интервал начальных значений задавался в пределах 10^{-3} Ки/м $< (q/U)_0 < 10^5$ Ки/м (что при скорости ветра 2,7 м/с соответствует диапазону интенсивности выброса $10^8 - 10^{16}$ Бк/с). Массив начальных значений $(q/U)_0$ при заданном шаге величины в логарифмическом масштабе состоял из 901 значений. С помощью фильтра Калмана последовательно для каждого временного периода из табл. 1 выполнялась процедура определения оптимальных значений интенсивности выброса и направления ветра для каждой пары их начальных значений $(q/U)_0$ и 2_0 из двумерного массива размерности 901 Н 401.

На рис. 3, *a* приведены результаты исследования сходимости алгоритма для каждого из 8 временных периодов при применении стандартного алгоритма фильтра Калмана (уравнения (4) - (8)). Для периодов А, В, С, D, Е (в течение 26 – 27 апреля 1986 г.) сходимость обеспечивается при отклонении начального приближения от оптимального значения до 5 - 10° по направлению ветра и до 3 - 5 раз для интенсивности выброса. При большем отклонении хотя бы одного из начальных приближений сходимость решения может быть не достигнута. Как видно из рис. 3, *a*, при выборе начального приближения для интенсивности выброса, отличающегося от оптимального на порядок и более, алгоритм не гарантирует сходимость даже при высокой точности метеорологических данных. По мере накопления радиоактивных выпадений на земной поверхности и, соответственно, увеличения их вклада в измеряемую МЭД алгоритму становится все труднее выделить вклад «воздушной» компоненты и оценить по ней величину выброса (периоды F, G, H с вечера 27 апреля по 29 апреля). Для последних двух периодов численное решение расходится практически во всем диапазоне начальных значений (за исключением нескольких точек).



Продолжение рис. 3 на с. 47.

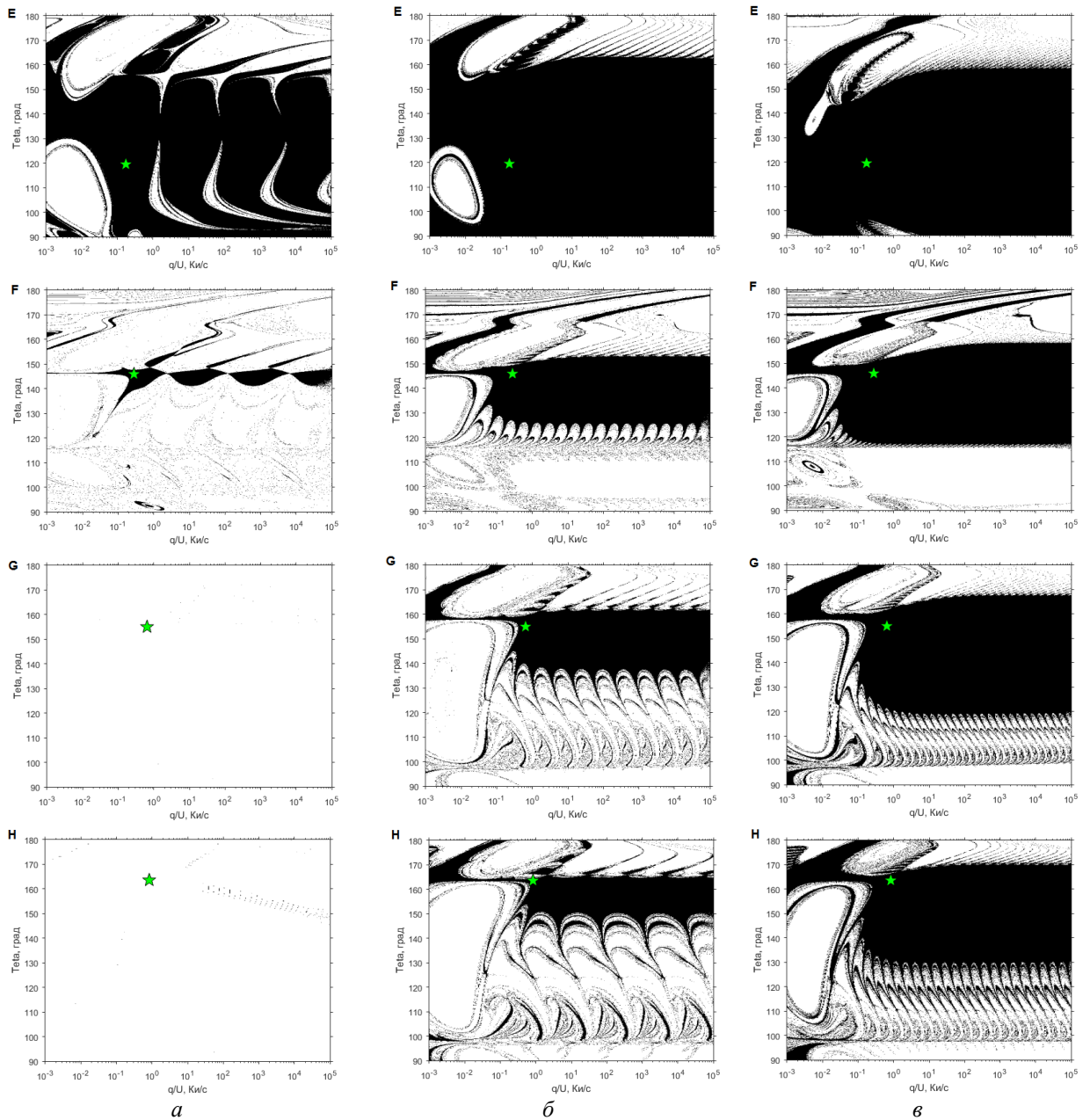


Рис. 3. Области выбора начальных значений $(q/U)_0$ и 2_0 (выделены черным цветом), при которых численный алгоритм сходится к оптимальным значениям q/U и 2 (отмечены звездочкой) для каждого из 8 периодов (обозначение периода указано в левом верхнем углу рисунка): *а* - $N_K = 1$; *б* - $N_K = 2$; *в* - $N_K = 4$.

Неустойчивость численного решения объясняется значительной нелинейностью связей между вектором параметров системы X и вектором измерений Y . Для улучшения сходимости численного решения была применена простая модификация алгоритма. На этапе коррекции фильтра Калмана на каждом шаге итераций для нахождения уточненных значений X^a и ковариационной матрицы P^a вместо уравнений (7) и (8) использовались выражения

$$X^a = X^f + \frac{K}{N_K}(Y - HX^f), \tag{9}$$

$$P^a = (I - \frac{K}{N_K}H)P^f, \tag{10}$$

где N_K – заданное число, большее 1. Значение $N_K = 1$ соответствует стандартному методу (см. рис. 3, *а*).

Как показали расчеты, при возрастании параметра N_K увеличивается число итераций работы фильтра для достижения заданной точности оценок параметров, что, однако, незначительно сказывается на быстродействии выполнения численных расчетов. При этом, как видно из рис. 3, б ($N_K = 2$) и в ($N_K = 4$), устойчивость численного решения значительно повышается в широком диапазоне значений начальных оценок.

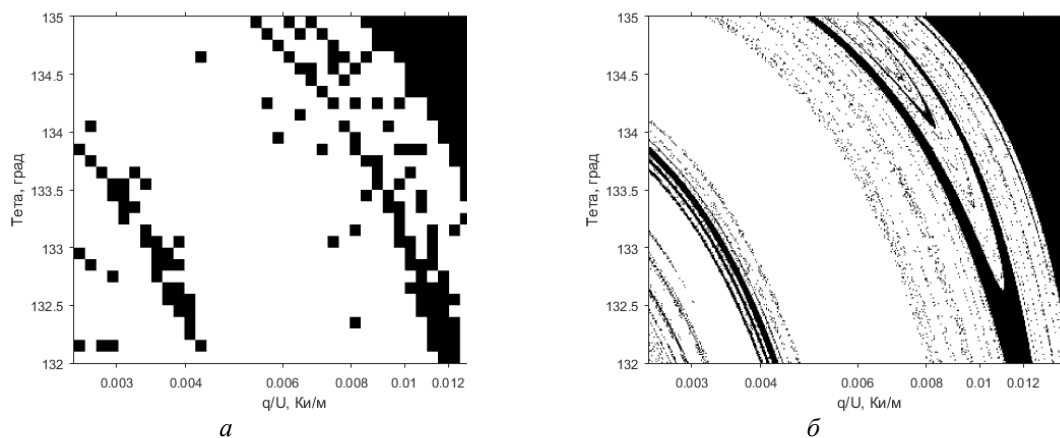


Рис. 4. Области выбора начальных значений q/U и θ , при которых численный алгоритм сходится к оптимальным значениям для периода А: а – «грубая» сетка; б – «мелкая» сетка.

Отметим, что «переходные» области между связными областями сходимости решения (черный цвет) и отсутствия сходимости (белый цвет) на рис. 3 имеют свою сложную структуру, детали которой могут быть найдены при расчетах по более мелкой сетке. На рис. 4, а показан фрагмент рис. 3, а для временного периода А (см. табл. 1) в диапазоне начальных значений $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ки/м} < (q/U)_0 < 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ Ки/м}$, $132^\circ < \theta_0 < 135^\circ$, а на рис. 4, б – результаты аналогичных оценок, выполненных по более мелкой сетке (шаг сетки по q/U и θ уменьшен в 10 раз).

Выводы

1. Тестирование алгоритма, основанного на использовании фильтра Калмана, для реконструкции интенсивности радиоактивного выброса в начальный период Чернобыльской аварии, показало, что он может успешно применяться для оценки параметров источника по данным радиационного мониторинга, в том числе с использованием результатов измерений МЭД на радиоактивно загрязненной территории.

2. Сходимость численной процедуры поиска оптимальной оценки параметров существенно зависит от выбора начального приближения. В случае продолжительного нестационарного выброса требования к «удачному» выбору начальной оценки параметров источника ужесточаются, поскольку по мере накопления радиоактивных выпадений на поверхности земли в течение рассматриваемого периода сходимость стандартного метода фильтра Калмана может ухудшаться. Для длительных (несколько суток) выбросов стандартный алгоритм поиска оптимальной оценки, использующий данные измерений МЭД, может оказаться неустойчивым даже при значениях начальных оценок, близких к оптимальным.

3. Для решения указанной проблемы предложена модификация алгоритма для улучшения сходимости при сильно зашумленных данных, позволяющая добиться сходимости метода при большой неопределенности первоначальной оценки параметров источника. Для рассмотренной задачи восстановления аварийного выброса из ЧАЭС решение сходится к оптимальной оценке при выборе начального приближения для направления ветра в секторе шириной до $50 - 70^\circ$. Для интенсивности выброса сходимость решения обеспечивается при любом выборе начальной оценки, большей оптимального значения даже на несколько порядков. При начальной недооценке значения интенсивности выброса (до одного порядка и более) численное решение расходится.

4. Для более общей задачи реконструкции параметров источника выброса с использованием фильтра Калмана, целесообразно рассматривать 3-параметрическую обратную задачу атмосферного переноса, включающую в себя и оценку значения эффективной высоты источника (с учетом изменения ее во времени).

5. Алгоритм, основанный на использовании фильтра Калмана, может быть использован в компьютерных системах поддержки принятия решений при радиационных авариях на АЭС для восстановления параметров источника аварийного выброса с использованием данных измерений штатных АСКРО АЭС. Возможность его использования для детектирования и оценки параметров аварийного выброса по данным АСКРО может быть исследована превентивно (до возможной аварии) на основе результатов модельных расчетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hutchinson M.* A review of source term estimation methods for atmospheric dispersion events using static or mobile sensors / M. Hutchinson, H. Oh, W.-H. Chen // *Information Fusion*. – 2017. – Vol. 36. – P. 130 – 148.
2. *Rao K. S.* Source estimation methods for atmospheric dispersion / K. S. Rao // *Atmospheric Environment*. – 2007. – Vol. 41. – P. 6964 - 6973.
3. *Paradigms and commonalities in atmospheric source term estimation methods* / P. E. Bieringer, G. S. Young, L. M. Rodriguez et al. // *Atmospheric Environment*. – 2017. – Vol. 156. – P. 102 – 112.
4. *Redwood M.* Source term estimation and event reconstruction: a survey. Report for the Atmospheric Dispersion Modelling Liaison Committee. – 2011. – P. 1-21 [электронный ресурс <http://www.admlc.org.uk/documents/ADMLC-R6-2011-1.pdf>].
5. *Талерко Н. Н.* Восстановление параметров чернобыльского выброса по измерениям мощности экспозиционной дозы в г. Припять / Н. Н. Талерко // *Ядерна фізика та енергетика*. – 2010. – Т. 11. – № 2. – С. 169 – 177.
6. *Data Assimilation in the Early Phase: Kalman Filtering, RIMPUFF* / P. Astrup, C. Turcanu, R. O. Puch et al. – 2004. – Risø-R-1466 (EN).
7. *Data assimilation in the decision support system RODOS* / C. Rojas-Palma et al. // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2003. – Vol. 104. – No. 1. – P. 31–40.
8. *Modified ensemble Kalman filter for nuclear accident atmospheric dispersion: Prediction improved and source estimated* / X. L. Zhang, G. F. Su, H. Y. Yuan et al. // *Journal of hazardous materials*. – 2014. – Vol. 280. – P. 143 – 155.
9. *Iterative ensemble Kalman filter for atmospheric dispersion in nuclear accidents: An application to Kincaid tracer experiment* / X. L. Zhang, G. F. Su, J. G. Chen et al. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2015. – Vol. 297. – P. 329 – 339.
10. *Data assimilation in the atmospheric dispersion model for nuclear accident assessments* / D. Q. Zheng, J. Leung, B. Lee, H. Lam // *Atmos. Environ.* – 2007. – Vol. 41. – P. 2438 – 2446.
11. *Zheng D. Q.* An ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation: application to wind tunnel data / D. Q. Zheng, J. K. C. Leung, B. Y. Lee // *Atmos. Environ.* – 2010. – Vol. 44. – P. 1699 – 1705.
12. *Kalman filtration of radiation monitoring data from atmospheric dispersion of radioactive materials* / M. Drews, B. Lauritzen, H. Madsen, J. Q. Smith // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2004. – Vol. 111. – No. 3. – P. 257 – 269.
13. *Likhtarev I. A.* Retrospective reconstruction of individual and collective external gamma doses of population evacuated after the Chernobyl accident / I. A. Likhtarev, V. V. Chumak, V. S. Repin // *Health Physics*. – 1994. – Vol. 66(6). – P. 643 – 652.
14. *Atmospheric dispersion in nuclear power plant siting: A safety guide* / IAEA Safety series. No. 50-SG-S3. – Vienna, 1980. – 108 p.
15. *United Nations.* Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000 Report to General Assembly. – N.Y., 2000.

М. М. Талерко, Д. В. Жігінас, Г. Г. Кузьменко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

ВІДНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛА РАДІОАКТИВНИХ ВИКИДІВ ЗА ДАНИМИ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІЛЬТРА КАЛМАНА

Досліджено можливість застосування методу розв'язання оберненої задачі атмосферного переносу, що використовує розширений фільтр Калмана, для відновлення параметрів аварійного викиду з Чорнобильської АЕС на основі даних вимірювань потужності експозиційної дози (ПЕД), проведених у м. Прип'ять із 26 по 29 квітня 1986 р. Реконструйовано значення добових викидів радіонуклідів, а також метеорологічних параметрів у початковий період аварії. Отримано, що збіжність методу істотно залежить від якості вихідних даних вимірювань ПЕД, а також вибору початкових значень ітераційного процесу розрахунків за методом фільтра Калмана. Показано, що в міру накопичення радіоактивних випадін на поверхні землі протягом аналізованого періоду збіжність стандартного методу фільтра Калмана може погіршуватися. Запропоновано модифікацію алгоритму для поліпшення збіжності при сильно зашумлених даних, що дає змогу покращити метод при великій невизначеності початкової оцінки параметрів джерела.

Ключові слова: Чорнобильська аварія, моделювання атмосферного перенесення, потужність експозиційної дози, реконструкція параметрів джерела викиду, фільтр Калмана.

**RECONSTRUCTION OF RADIOACTIVE EMISSION SOURCE TERM PARAMETERS
USING RADIATION MONITORING DATA WITH THE KALMAN FILTER**

The applicability of the method for solving the inverse problem of atmospheric transport using the extended Kalman filter was studied to restore the parameters of the accident release from the Chernobyl nuclear power plant on the basis of the exposure dose rate measurements made in Pripjat town from 26 to 29 April 1986. The daily radionuclide emission values and meteorological parameters were estimated in the initial period of the accident. It was obtained that the convergence of the method essentially depends on the quality of the initial data of the gamma dose rate measurements, as well as the choice of the initial values in the iterative calculation process using the Kalman filter method. It was shown that depending on the accumulation of radioactive fallout on the earth surface during the period under consideration, the convergence of the standard Kalman filter method may deteriorate. A modification of the algorithm is proposed to improve the convergence with highly noisy data, which makes it possible to achieve convergence of the method with a large uncertainty in the initial estimation of the source parameters.

Keywords: Chernobyl accident, atmospheric transport modeling, exposure dose rate, emission source parameters reconstruction, Kalman filter.

REFERENCES

1. *Hutchinson M.* A review of source term estimation methods for atmospheric dispersion events using static or mobile sensors / M. Hutchinson, H. Oh, W.-H. Chen // *Information Fusion* – 2017. – Vol. 36. – P. 130 – 148.
2. *Rao K. S.* Source estimation methods for atmospheric dispersion / K. S. Rao // *Atmospheric Environment*. – 2007. – Vol. 41. – P. 6964 – 6973.
3. *Paradigms and commonalities in atmospheric source term estimation methods* / P. E. Bieringer, G. S. Young, L. M. Rodriguez et al. // *Atmospheric Environment*. – 2017. – Vol. 156. – P. 102 – 112.
4. *Redwood M.* Source term estimation and event reconstruction: a survey. Report for the Atmospheric Dispersion Modelling Liaison Committee. – 2011. – P. 1-21 [Available online at: <http://www.admlc.org.uk/documents/ADMLC-R6-2011-1.pdf>].
5. *Talerko M. M.* Reconstruction of Chernobyl source parameters using gamma dose rate measurements in town Pripjat / M. M. Talerko // *Yaderna fizyka ta energetyka (Nuclear Physics and Atomic Energy)*. – 2010. – Vol. 11. – № 2. – P. 169 – 177. (Rus)
6. *Data Assimilation in the Early Phase: Kalman Filtering, RIMPUFF* / P. Astrup, C. Turcanu, R. O. Puch et al. – 2004. – Risø-R-1466 (EN).
7. *Data assimilation in the decision support system RODOS* / C. Rojas-Palma et al. // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2003. – Vol. 104. – No. 1. – P. 31 – 40.
8. *Modified ensemble Kalman filter for nuclear accident atmospheric dispersion: Prediction improved and source estimated* / X. L. Zhang, G. F. Su, H. Y. Yuan et al. // *Journal of hazardous materials*. – 2014. – Vol. 280. – P. 143 – 155.
9. *Iterative ensemble Kalman filter for atmospheric dispersion in nuclear accidents: An application to Kincaid tracer experiment* / X. L. Zhang, G. F. Su, J. G. Chen et al. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2015. – Vol. 297. – P. 329 – 339.
10. *Data assimilation in the atmospheric dispersion model for nuclear accident assessments* / D. Q. Zheng, J. Leung, B. Lee, H. Lam // *Atmos. Environ.* – 2007. – Vol. 41. – P. 2438 – 2446.
11. *Zheng D. Q.* An ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation: application to wind tunnel data / D. Q. Zheng, J. K. C. Leung, B. Y. Lee // *Atmos. Environ.* – 2010. – Vol. 44. – P. 1699 – 1705.
12. *Kalman filtration of radiation monitoring data from atmospheric dispersion of radioactive materials* / M. Drews, B. Lauritzen, H. Madsen, J. Q. Smith // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2004. – Vol. 111. – No. 3. – P. 257 – 269.
13. *Likhtarev I. A.* Retrospective reconstruction of individual and collective external gamma doses of population evacuated after the Chernobyl accident / I. A. Likhtarev, V. V. Chumak, V. S. Repin // *Health Physics*. – 1994. – Vol. 66(6). – P. 643 – 652.
14. *Atmospheric dispersion in nuclear power plant siting: A safety guide* / IAEA Safety series. No. 50-SG-S3. – Vienna, 1980. – 108 p.
15. *United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000 Report to General Assembly.* – N.Y., 2000.

Надійшла 18.04.2018
Received 18.04.2018