

УДК 551.509.313+504.61

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ MM5 К УСЛОВИЯМ УКРАИНЫ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ ПРОГНОЗА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА И ОСАЖДЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ АЭС

Т. Д. Лев, С. В. Мисник, О. Г. Тищенко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Представлены материалы по адаптации открытой численной гидродинамической модели прогноза погоды Пенсильванского университета США MM5 к географическим условиям Украины и оценки прогнозов полей температуры и давления (геопотенциала) для территории Украины и районов расположения АЭС Украины. Средствами геоинформационных систем проведена классификация входной географической информации (растительности/землепользования, типов почв) в категории модели MM5. Численные эксперименты и проведенная предварительная оценка успешности прогнозов температурного и барического полей показали, что использование данных численного прогноза погоды, полученных по открытой системе MM5 является успешным и может обеспечить необходимую оперативность в оценке распространения радиоактивных выбросов в случае аварии на АЭС.

Институт проблем безопасности АЭС (ИПБ АЭС) НАН Украины располагает гидродинамической мезомасштабной диффузной моделью переноса и осаждения радиоактивных элементов из АЭС (LEDI), которая была разработана после аварии на ЧАЭС и верифицирована на данных чернобыльского загрязнения [1]. Для реализации и использования разработанной модели LEDI на АЭС Украины при коммунальных авариях необходимо обеспечить модель соответствующими данными. Это, прежде всего, информация о географических особенностях территории АЭС, входная метеорологическая информация в виде данных численного прогноза погоды, получаемых независимой мезомасштабной моделью численного прогноза погоды (MM5, WRF, HIRLAM). Согласно требованиям МАГАТЭ № NS-G-3.2, «...метеорологические данные должны быть совместимы по условиям их природы, сфере действия и погрешности с методами и моделями, в которых они будут использоваться для оценки радиационного воздействия на население и радиологического воздействия на окружающую среду» [2].

По состоянию на сегодняшний день Украинский гидрометеорологический центр не располагает национальной моделью численного прогноза погоды с необходимым пространственно-временным разрешением для информационно-аналитического обеспечения модели переноса и осаждения радиоактивных элементов из АЭС. В связи с этим перед нами стояла задача использовать доступные в международной синоптической практике высококачественные данные прогноза погоды с высоким вертикальным и горизонтальным разрешением в моделях переноса и осаждения радиоактивного аэрозоля. Такими данными располагают международные метеорологические центры США и Европы. Данные, полученные в результате работы гидродинамических моделей прогноза погоды (в США - модели MM5, Eta, WRF, в Германии и Швейцарии - Cosmo, в отдельных странах Европы - HIRLAM и т.п.), имеют ряд преимуществ [3]:

использование условия «негидростатичности» атмосферного давления, что принципиально важно при высоком разрешении модели (MM5, WRF, Cosmo);

хорошо документированная и протестированная модель MM5 и сертифицированные системы WRF и Eta;

открыто распространяемые через Интернет модели MM5 и WRF;

использование различных типов начальных данных и краевых условий – WRF, MM5, кроме COSMO.

Для метеорологического обеспечения модели атмосферного переноса LEDI диагностическими и прогностическими данными была выбрана открытая и доступная через Интернет модель прогноза погоды США MM5. Установка, инсталляция модели MM5, ее реализация на операционной системе LINUX в отделе безопасности и реабилитации окружающей среды ИПБ АЭС была проведена совместно с отделом математического моделирования окружающей среды ИПММС (Институт проблем математических машин и систем НАН Украины). Была проведена инициализация и адаптация входной стационарной информации: категорий землепользования, рельефа, растительности, почвы, температуры подстилающей поверхности для территории Украины.

Адаптация гидродинамической модели прогноза погоды MM5 к условиям Украины

Адаптация данных о растительности/землепользовании и почвы в модели MM5 к условиям Украины проводилась в три этапа:

нахождение соответствия между классификаторами, используемыми в модели MM5 и применяемыми в Украине;

проведение классификации цифровых карт растительности и почвы в категории модели MM5 и пространственная корректировка полигонов для отдельных категорий (классов) средствами геоинформационных систем (ГИС);

построение «сеточных» данных о категориях растительности и почвы путем проведения оверлейных операций прямоугольных сеток с шагами (81, 27, 9, 3 км) в проекции Ламберта для главных широт Украины 43° и 53° с полигональными картографическими покрытиями с присвоением преобладающей категории (по максимальной площади выбранного параметра в рамках ячейки регулярной сетки).

В качестве исходных картографических данных по территории Украины были использованы цифровые материалы из географического Атласа Украины (разработчики Институт географии НАН Украины и ООО «ИС ГЕО») масштаба 1 : 3000000: карты растительности и почвы с соответствующими легендами (классификаторами).

Источниками географической информации в модели MM5 являются:

для 25 категорий растительности/землепользования данные геологической службы США (USGS) в узлах сетки с 30-секундным шагом (0, 925 км) в проекции Ламберта;

для 17 категорий почвы данные Продовольственной и сельскохозяйственной организации (FAO) и Государственной географической базы почвенных данных (State Soil Geographic (STATSGO) Database) в узлах сетки с 30-секундным шагом (0, 925 км) в проекции Ламберта.

Существует два основных принципа проведения классификации почвы:

на основании содержания физической глины с учетом доминирующей фракции и типа почвообразования; классификация создана Н. А. Качинским и принята в России и Украине;

на основании относительного содержания фракций песка, пыли и глины по Аттербергу принята в странах Европы и Америки. Для определения названия почвы используется *треугольник Ферре* [3, 4].

Однозначного перехода от одной классификации к другой не существует, однако, используя кумулятивную кривую распределения гранулометрических элементов по размерам гранулометрического состава почв, определяется почва по обеим классификациям [3]. Цифровая почвенная карта Украины, содержащая 40 типов почв, была дополнительно обработана средствами ГИС MapInfo с выделением почв по механическому составу. Для 17 категорий почвы модели MM5 с помощью треугольника Ферре по названию почвы определялось процентное содержание песка, глины и ила в почве. Для выбранного процентного содержания гранулометрического состава почвы находилось соответствие типу почвы классификации Н. А. Качинского на карте М 1 : 300000. Таким образом, почвенная карта Украины была переклассифицирована в категории почвы модели MM5. Распределение занимаемых площадей по категориям почв представлено в табл. 1, из которой видно, что в отличие от

модельных данных в Украине фактически представлено три класса механического состава почвы в категориях ММ5: песчаный суглинок, илистый суглинок и глинистый суглинок. Дополнительно была проклассифицирована органическая почва.

Таблица 1. Распределение занимаемых площадей по категориям почв модели ММ5 и скорректированной почвы по территории Украины

Название почвы по-английски	Название почвы по-русски	Занимаемая площадь по модели ММ5, км ²	Скорректированная занимаемая площадь, км ²
Sand	Песок	2955,4	54528,6
Loamy sand	Супесь	173,1	24278,8
Sandy loam	Песчаный суглинок	74481,7	103811,3
Silt loam	Илистый суглинок	132309,0	130822,0
Loam	Суглинок	258222,7	521,1
Sandy clay loam	Песчаный глинистый суглинок	8947,7	173,9
Clay loam	Глинистый суглинок	106100,3	132215,8
Clay	Глина	260,7	121677,5
Organic	Органические материалы	0,0	17074,3

В соответствии с 25 категориями растительности/землепользования в модели ММ5 были укрупнены классы растительного покрова из географического Атласа Украины. Было проведено редактирование цифровых покрытий (укрупнение и объединение полигонов для некоторых классификационных категорий, и добавление отдельных признаков, таких как орошаемые и осушенные земли). Редактирование проводилось средствами ГИС Mapinfo с использованием языка запросов. Количество категорий растительности и почв определило достаточность использования карт масштаба 1 : 3000000 в качестве цифрового источника данных. Как видно из рис. 1, данные модели ММ5 (источник USGS) некорректно описывают растительность/землепользование в Украине, а соответственно, данные о шероховатости, скоростях сухого осаждения, используемых в моделях атмосферного переноса аэрозоля.

Температура подстилающей поверхности почвы в модели ММ5 была откорректирована в соответствии с пространственным распределением климатических данных Укгидромета по территории Украины.

Откорректированные цифровые (полигональные) карты растительности, почвы и температуры подстилающей поверхности были пересечены с построенными регулярными сетками (DOMAINS) в проекции Ламберта с шагами 81, 27, 9 и 3 км, покрывающими территорию Украины.

Для численных экспериментов были построены счетные области (рис. 2): первая область 37 × 37 ячеек (81 км), вторая область 73 × 73 ячеек (27 км), третья область 100 × 139 ячеек (9 км), четвертая и пятая области 100 × 100 ячеек (3 км). Причем каждая последующая сетка расположена внутри предыдущей сетки с отступом по краям от 6 до 12 рядов для исключения дополнительных граничных ошибок. Поскольку в рамках одной ячейки сетки могут быть несколько категорий используемого параметра, то выбирается преобладающая по площади категория и присваивается данной ячейке или точке в середине ячейки (CROSS). На границах Украины поступаем аналогичным образом.

Подготовленные атрибутивные данные о растительности, почвы в категориях модели ММ5 и температуры подстилающей поверхности для середин ячеек сеток в формате Mapinfo конвертируются в текстовые файлы для использования на этапе инициализации первичной (исходной) информации для модели ММ5 в блоке TERRAIN.

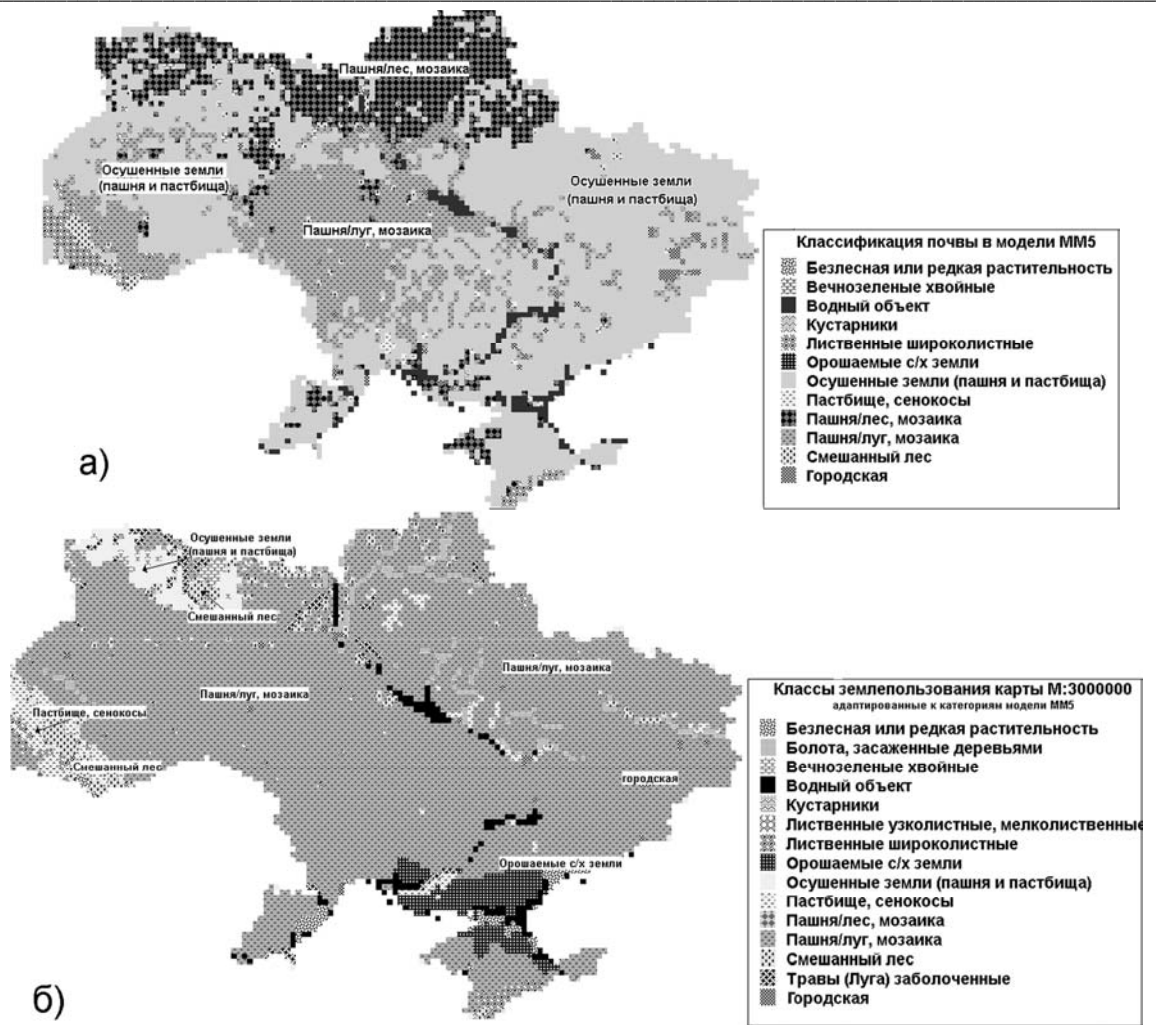


Рис. 1. Пространственное распределение растительности по территории Украины:
 а – USGS; б – географический Атлас Украины.

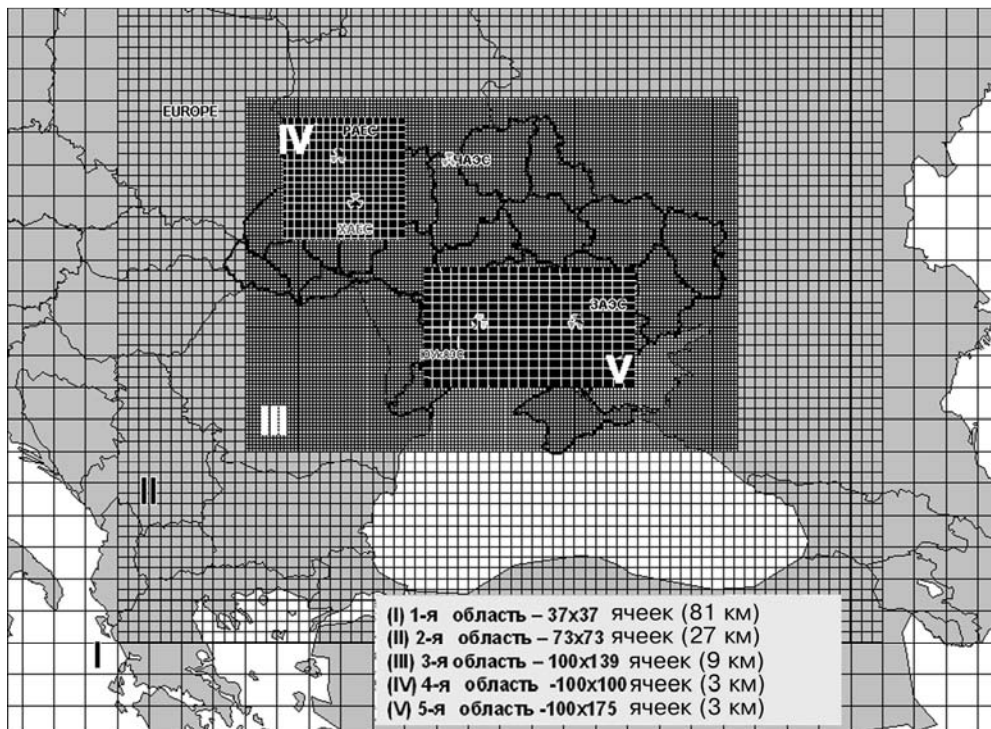


Рис. 2. Области счета.

Численные результаты и оценки оправдываемости прогноза метеорологических полей модели MM5

Подготовленная и адаптированная к географическим условиям территории Украины входная информация была внедрена в блок исходных данных модели MM5 и использована для проведения численных экспериментов и оценки оправдываемости прогноза погоды для территории Украины (область III) и Ровенской АЭС (область IV). Оценка оправдываемости проводилась в соответствии с методическими указаниями [4] для метеорологических элементов T, H (температура, геопотенциал, скорость и направление ветра для изобарических поверхностей 1000, 925, 850, 700 гПа) на срок прогноза - 24 ч. Расчеты были сделаны для различных типов синоптических ситуаций с большой и малой фактической изменчивостью полей. Тестирование схемы MM5 проводилось при закрепленных схемах вычисления ПСА (пограничный слой атмосферы), облачности, конвекции, солнечной радиации и т.д.

Были отобраны две выборки данных (данные реанализа от NCEP¹): апрель - май 1986 и октябрь 2006 г. (69 случаев). Вычисления были сделаны для четырех областей, начиная с грубой сетки 81 км и для территорий атомных станции с шагом сетки 3 км.

Предварительно была проведена классификация синоптических ситуаций (табл. 2) по «эталонному типу» (было выделено 8 типов для данной выборки) [7, 8].

Таблица 2. Повторяемость типовых классов синоптических ситуаций

Тип синоптической ситуации	Характеристика ситуации	Количество случаев	Повторяемость, %
Ось гребня, антициклон	Стабильная погода, незначительные горизонтальные градиенты давления	19	27,54
Ось ложбины, циклон	Нестабильная погода, частые осадки, резкие изменения скорости и направлений ветра	3	4,35
Тыл ложбины, циклон	Адвекция холодного воздуха с севера и северо-запада, большие горизонтальные градиенты давления. Прохождение вторичных холодных фронтов	6	8,7
Передняя часть ложбины, циклон	Адвекция теплого или влажного воздуха с юга, значительные барические градиенты, прохождение теплых фронтов	5	7,25
Прямолинейные изобары	Ситуация возникает между западной периферией антициклона и передней частью циклона. Значительные выносы тепла и порывы ветра южных направлений	3	4,35
Седловина, малоградиентное поле	Малые горизонтальные барические градиенты, слабые ветры или штилевая погода	27	39,13
Западная периферия гребня, антициклон	Прилегает к области низкого давления. Прохождение теплого фронта и фронта окклюзии. Зимой незначительные осадки, летом нестабильная погода с грозами	3	4,35
Восточная периферия гребня, антициклон	Граничит с тыловой частью циклона, сопровождается адвекцией холодного воздуха. Летом возможно образование кучевых дождевых облаков и выпадение ливневых осадков, зимой преимущественно малооблачная стойкая погода	3	4,35
Общее количество		69	100,0

¹ NCEP - National Centers for Environmental Prediction (Национальный центр прогноза окружающей среды).

Для оценки качества региональных численных прогнозов были рассчитаны стандартные статистические характеристики [6]:

средняя абсолютная ошибка прогноза (с точностью до 0,1);

средняя относительная ошибка прогноза (с точностью до 0,01);

средняя квадратическая ошибка прогноза (с точностью до 0,1);

средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза (с точностью до 0,1).

Численные результаты были обработаны и систематизированы по классам синоптических ситуаций и по критерию «фактической изменчивости». Результаты осредненных оценок оправдываемости для барического поля представлены в табл. 3.

Таблица 3. Средняя оценка оправдываемости прогноза высоты геопотенциала (м) в слое давления 1000 - 700 гПа по модели ММ5 (1986, 2006 гг.)

Тип синоптической ситуации (69 случаев)	Количество случаев, %	Средняя абсолютная ошибка прогноза (δ), м	Средняя квадратичная ошибка прогноза (σ), м	Средняя относительная ошибка прогноза (ϵ)	Средняя систематическая ошибка прогноза ($\delta \sim$), м
Ось гребня, антициклон - класс 1	27,6	14,1	16,7	0,57	4,0
Ось ложбины, циклон - класс 2	5,2	25,6	30,8	0,62	12,5
Тыл ложбины, циклон - класс 3	8,6	19,3	24,6	0,58	3,7
Передняя часть ложбины, циклон - класс 4	5,2	31,5	36,3	0,55	25,5
Прямолинейные изобары - класс 5	5,2	22,1	28,6	0,67	10,7
Седловина, малоградиентное поле - класс 6	41,4	9,4	11,9	0,42	-0,4
Западная периферия гребня, антициклон - класс 7	3,4	11,3	13,8	0,56	4,4
Восточная периферия гребня, антициклон - класс 8	3,4	12,1	15,3	0,43	-5,4
Средняя	100	14,3	17,6	0,51	3,7

Численные прогнозы на 24 ч показывают хорошие оценки оправдываемости прогнозов метеорологических параметров: относительная ошибка геопотенциала изменяется от 0,4 до 0,67 на изобарических уровнях 1000 - 700 гПа. Относительные ошибки прогноза геопотенциала для классов ситуаций с малоградиентными полями (класс 6) и для восточной периферии антициклонов (класс 8) небольшие (0,42 - 0,43). Был проведен сравнительный анализ статистических оценок оправдываемости численных прогнозов геопотенциала с различными шагами сетки по горизонтали и для разных градаций фактической изменчивости (рис. 3).

Для областей с 3-километровым шагом сетки все статистические характеристики оценки оправдываемости прогноза геопотенциала являются наименьшими - просматривается тенденция уменьшения ошибок с уменьшением шага сетки для всех изобарических поверхностей.

Для случаев с фактической изменчивостью в пределах 20 - 30 м высот изобарических поверхностей 925 и 850 гПа наблюдаются минимальные относительные ошибки 0,35 - 0,37. Наибольшие относительные ошибки прогноза геопотенциала наблюдаются для случаев с малой (0 - 10 м) и большой фактической изменчивостью (> 40 м), что подтверждается и другими авторами [5, 9].

В табл. 4 представлены результаты осредненных оценок оправдываемости прогноза поля температуры в слое 925 - 700 гПа. Наименьшие ошибки прогноза температуры в этом



Рис. 3. Сравнительная оценка статистических параметров прогноза давления (геопотенциала) в зависимости от шага сетки.

слое наблюдаются для случаев с малоградиентными полями давления и антициклональным барическим полем (классы 1, 6 - 8). Абсолютная ошибка прогноза температуры для указанных классов не превышает 2 °С, что соответствует 100 % оправдываемости прогнозов. Относительная ошибка прогноза температуры на уровнях выше 1000 гПа изменяется в среднем от 0,4 до 0,7. Относительная ошибка прогноза для приземной температуры воздуха значительно выше и меняется от 0,8 до 1 и выше. Это объясняется тем, что в инсталлированном варианте модели MM5 в ИПБ АЭС не подключена модель LSM (Land Surface Model), которая обеспечивает параметризацию процессов приземного слоя атмосферы и суточные изменения температуры и энергии турбулентности.

Тестирование MM5 проводилось при закрепленных схемах параметризации физических процессов подсеточных масштабов (ПСА, облачности, конвекции, радиации).

Таблица 4. Средняя оценка оправдываемости температуры в слое 925 - 700 гПа по классам синоптических ситуаций

Тип синоптической ситуации (69 случаев)	Количество случаев, %	Средняя абсолютная ошибка прогноза (δ)	Средняя квадратичная ошибка прогноза (σ)	Средняя относительная ошибка прогноза (ε)	Средняя систематическая ошибка прогноза (δ~)
Ось гребня, антициклон	27,6	1,3	1,7	0,65	-0,3
Ось ложбины, циклон	5,2	2,7	3,5	0,73	1,3
Тыл ложбины, циклон	8,6	2,1	2,7	0,62	0,7
Передняя часть ложбины, циклон	5,2	2,0	2,6	0,71	-0,1
Прямолинейные изобары	5,2	2,2	2,8	0,72	-1,5
Седловина, малоградиентное поле	41,4	1,2	1,5	0,66	0,0
Западная периферия гребня, антициклон	3,4	1,4	1,7	0,62	-0,3
Восточная периферия гребня, антициклон	3,4	1,2	1,5	0,48	0,3
Средняя	100	1,5	1,9	0,66	-0,1

Подготовленный вариант модели MM5 был использован для проведения расчетов формирования полей радиоактивных выпадений по диффузионной модели LEDI в случае аварийной ситуации на АЭС с использованием разных наборов метеоинформации:

- данных численного прогноза погоды по модели MM5;
- данных службы Укргидромета (семь близлежащих станций);
- данных станций ветрового зондирования (Шепетовка, Брест).

Расчеты были проведены для нестационарных условий – выход и прохождение циклона по территории Украины с СЗ на ЮВ. Метеорологическая информация численного прогноза погоды – 3-мерные поля ветра, температуры, геопотенциала и осадков были препроцессированы в характеристики турбулентности пограничного слоя атмосферы и использованы в модели атмосферного переноса.



Рис. 4. Сравнительная характеристика расчетов направлений выброса при разных метеоданных

Результаты показали, что при нестационарных синоптических процессах (прохождение фронта, конвективные явления и т.п.) использование только текущей информации Гидрометцентра (рис. 4б, рис. 4в) для прогнозирования радиоактивного загрязнения дает существенные ошибки даже в зоне около АЭС (на расстоянии до 30 км). В этом случае ошибка в определении направления распространения радиоактивного загрязнения может достигать 40 - 90 град. Использование данных численного прогноза погоды (с разрешением сетки 9 – 3 км и шагом по времени 1 ч) улучшает прогноз развития радиационной обстановки в зоне ответственности АЭС.

Проведенный модельный расчет показал, что использование полученных по модели MM5 метеопараметров уточняет направление распространения выброса и, соответственно, корректирует меры по предупреждению последствий радиационного облучения населения 60 пунктов, попавших в зону загрязнения для конкретного гипотетического расчета (рис. 4а).

Выводы

Подготовленный и адаптированный к географическим условиям Украины вариант входной стационарной информации (растительность/землепользование, рельеф, типы почв, температура подстилающей поверхности) внедрен в блок TERRAIN модели численного прогноза погоды MM5 и может быть использован для расчета метеопараметров на срок до 24 ч. Проведенные численные эксперименты с моделью MM5 и полученные предварительные оценки успешности прогнозов температуры и геопотенциала показывают, что ошибки прогнозов метеопараметров удовлетворительны и близки к среднему уровню ошибок прогноза температурного и барического полей, полученных другими авторами в ходе оперативных и

авторских испытаний [5]. Прогностические данные, полученные по модели ММ5, могут быть использованы для метеообеспечения модели атмосферного переноса радиоактивных материалов из АЭС в случае аварийного выброса.

В дальнейшем необходимо продолжить численные эксперименты с моделью ММ5 с подключением «модели поверхностного слоя земли» и выбором наиболее оптимальных схем параметризации пограничного слоя атмосферы для разных типовых и экстремальных синоптических ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Талерко Н.Н., Гаргер Е.К.* Оценки первичного выброса из аварийного блока ЧАЭС с помощью моделирования атмосферного переноса (обзор). // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2006. - Вип. 6. - С. 80 - 90.
2. *Серия норм МАГАТЭ по безопасности № NS-G-3.2 «Рассеяние радиоактивных материалов в воздухе и воде и учет распределения населения при оценке площадки для атомных электростанций».* - <http://www.iaea.org/Publications/Standards/>.
3. *Шейн Е.В., Капинос В.А.* Сборник задач по физике почв. - М.: Изд-во МГУ, 1994. - 79 с.
4. *Brown R.B.* Soil Texture.SL29. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida, <http://edis.ifas.ufl.edu/>.
5. *Багров А. Н.* Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // Методический кабинет Гидрометцентра России. Информационный сборник № 35, с. 1 - 18 // <http://method.hydromet.ru/>.
6. *Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиографических прогнозов.* РД 52.27.284-91 / Комитет гидрометеорологии при Кабинете Министров СССР. - М., 1991. - 150 с.
7. *Методические указания по прогнозу загрязнения воздуха в городах /* Под ред. М. Е. Берлянда. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 80 с.
8. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды.* Ч. 1. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. - 640 с.
9. *Rubinstein K., Ignatov R., Gritsan E.* Using meso-scale model for supplying forecast of transport radionuclide / International Conference 'Mesoscale meteorology and air pollution', 15 - 17 Sept. 2008. - Odessa, Ukraine.

Поступила в редакцию 22.11.08