

содержанием 0,1—10% при выдержке отработавшего топлива 1—100 лет.

При обосновании параметров обращения с отработавшим топливом БРЕСТ-ОД-300 на основе концепции радиоэкологического баланса полагали, что оценки для человека носят приоритетный характер по сравнению с оценками для биоты. В то же время полученные результаты должны быть дополнены расчетами для биоты в целях полного анализа воздействия долгоживущих высокоактивных отходов на биосферу.

На основе оценок можно сделать выводы практического характера:

при выделении делящихся материалов и америция из отработавшего ядерного топлива реактора БРЕСТ-ОД-300 нельзя достичь радиоэкологического баланса для человека через 500 лет без извлечения продуктов деления;

время соблюдения радиоэкологического баланса 500 лет достижимо при выделении ^{99}Tc с остаточным содержанием в отходах 5% исходного, америция и делящихся материалов с остаточным содержанием 10 и 1% соответственно с выдержкой отработавшего топлива 1 год;

время достижения баланса можно снизить до 300 лет при дополнительном вместе с ^{99}Tc , америцием и делящимися материалами извлечении ^{137}Cs с остаточным содержанием в отходах 1% исходного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е.О., Ганев И.Х. Экологически безупречная ядерная энергетика. М., НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, 2007. 145 с.
2. Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Большов Л.А. и др. Проект «Прорыв» — технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. — Изв. РАН. Энергетика, 2015, № 1, с. 5—12.
3. Лопаткин А.В., Величкин В.И., Никипелов Б.В., Полуэктов П.П. Радиационная эквивалентность и природоподобие при обращении с радиоактивными отходами. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 4, с. 308—317.
4. Спирин Е.В., Алексахин Р.М., Спиридонов С.И. и др. Радиационный баланс отработавшего ядерного топлива тепловых реакторов и эквивалентной массы урана для природных организмов. — Там же, 2014, т. 116, вып. 6, с. 350—353.
5. Спирин Е.В., Алексахин Р.М., Власкин Г.Н., Уткин С.С. Радиационный баланс отработавшего ядерного топлива быстрого реактора и природного урана. — Там же, 2015, т. 119, вып. 2, с. 114—119.
6. Спиридонов С.И. Перспективы системной радиоэкологии в решении инновационных задач ядерной энергетики. — Радиационная биология. Радиоэкология, 2014, т. 54, № 4, с. 415—422.
7. ORIGEN-ARP 2.00. Isotope Generation and Depletion Code System — Matrix Exponential Method with GUI and Graphics Capability. RSICC Code Package C00702PC58600, May 2002.
8. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В. и др. Трансмутационный топливный цикл в крупномасштабной ядерной энергетике России. М., ГУП НИКИЭТ, 1999. 252 с.

Поступила в Редакцию 4.05.16

УДК 614.876+628.511

СИСТЕМА ПАРРАД И ЕЕ ИСПЫТАНИЯ НА РЕАЛЬНЫХ ВЫБРОСАХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

*Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Сорокикова О.С., Семенов В.Н., Игнатов Р.Ю.,
Губенко И.М., Благодатских Д.В. (ИБРАЭ РАН, г. Москва),
Рубинштейн К.Г., Смирнова М.М. (Гидрометцентр России, г. Москва)*

Современные подходы к прогнозированию распространения радионуклидов в атмосфере при радиационных авариях базируются на моделях переноса примесей (транспортных моделях), которые учитывают неоднородность метеорологических полей как во времени, так и в пространстве. К таким моделям можно отнести HYSPLIT, FLEXPART, НОСТРАДАМУС и др. [1—3].

Анализ последствий крупных аварий показал, что точность прогноза радиационной обстановки

зависит от качества прогностических полей метеорологических параметров [4, 5]. При улучшении пространственного разрешения численной прогностической модели повышается точность описания подстилающей поверхности, что позволяет повысить качество прогноза.

В настоящей статье описывается созданная в ИБРАЭ РАН система прогнозирования радиационной обстановки на основе прогностических полей метеорологических параметров высокого пространственного разрешения (до 2 км). Она

позволяет получать относительно реалистичный прогноз распространения радиоактивных веществ, поступающих в окружающую среду в течение короткого промежутка времени, что особенно важно при выработке мер защиты населения на острой фазе радиационной аварии.

Для получения метеорологических параметров высокого пространственного разрешения используют модели регионального масштаба. Одной из лучших и быстро развивающейся является метеорологическая модель WRF-ARW [6].

В основу функционирования системы прогнозирования аварийного распространения радионуклидов в атмосфере для действующих АЭС (ПАРРАД) заложено сопряжение транспортной (адвекционно-диффузионной) модели переноса радиоактивных веществ из кода НОСТРАДАМУС и метеорологической WRF-ARW. В статье описаны методическая и функциональная составляющие системы ПАРРАД. Кроме того, приводятся результаты испытания системы на примерах аварийного выброса на АЭС «Фукусима» (Япония), инцидента на заводе тяжелого машиностроения в г. Электростали и эксперимента ACURATE.

Описание моделей и их сопряжение. В системе ПАРРАД используется версия 3.6.1 модели WRF-ARW с пространственным разрешением 18 и 2 км для расчетной области 100 на 100 км. Исходными являются данные GFS (США) с пространственным разрешением 50 км.

В основу модели WRF-ARW положены уравнения для сжимаемой жидкости, записанные в декартовых координатах по горизонтали с использованием орографической координаты η , которая является аналогом σ -координаты, но отличается от нее тем, что определена через гидростатическую составляющую, а не через полное давление p :

$$\eta = (p_r - p_b)/\mu; \quad \mu = p_n - p_b, \quad (1)$$

где p_r — гидростатическая составляющая давления; p_n, p_b — гидростатическое давление на нижней и верхней границе соответственно.

С использованием уравнения (1) и преобразований [6] получена система уравнений, решение которой определяет поля скоростей ветра, температуры и давления. Кроме того, с помощью модели WRF-ARW можно выбрать пара-

метры пограничного слоя, которые используются в системе ПАРРАД в зависимости от особенностей местности.

Подход к выбору параметров физических процессов подсеточного масштаба позволяет определить поля температуры и скорости ветра для оценки направления и интенсивности переноса радиоактивных веществ. В текущей версии системы ПАРРАД используется полученный на основе исследований [7] единый для всех областей набор параметров, описывающих физические процессы в приземном слое атмосферы.

Радиационная обстановка прогнозируется с помощью лагранжевой транспортной модели, в которой распространение примеси в атмосфере описывается полуэмпирическим уравнением переноса—диффузии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial U c}{\partial x} + \frac{\partial V c}{\partial y} + \frac{\partial \hat{W} c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q + S, \end{aligned} \quad (2)$$

где c — объемная концентрация примеси в воздухе; $U = U(x, y, z, t)$, $V = V(x, y, z, t)$ — горизонтальные компоненты скорости ветра; $\hat{W} = W(x, y, z, t) - W_g$; $W(x, y, z, t)$ — вертикальный компонент скорости ветра; W_g — скорость гравитационного осаждения; $K_x(x, y, z, t)$, $K_y(x, y, z, t)$ — коэффициенты горизонтальной, $K_z(x, y, z, t)$ — вертикальной турбулентной диффузии; $Q(x, y, z, t)$ — мощность источника выброса; S — член, учитывающий вымывание радионуклидов осадками, радиоактивный распад и накопление.

Транспортные модели на основе лагранжева подхода хорошо себя зарекомендовали при моделировании атмосферной дисперсии примеси в случае аварий, для которых характерны большие градиенты концентрации примеси в атмосфере. Поэтому такие модели широко используются в составе современных систем прогнозирования, например, таких, как SILAM [8]. Лагранжева транспортная модель позволяет на основе прогностических полей WRF-ARW при радиационных авариях оценивать концентрацию радионуклидов в атмосфере и загрязнение поверхности земли. Транспортная модель и WRF-ARW верифицированы на экспериментах [9—11].

Сопряжение WRF-ARW и транспортной модели осуществляется по двум группам параметров — скорость ветра и коэффициент диффузии. По модели WRF-ARW вычисляют и передают в транспортную модель компоненты скорости ветра U, V, W .

Коэффициенты диффузии рассчитывают по полуэмпирическим зависимостям от параметров состояния атмосферы [12, 13]:

$$K_z = \begin{cases} \frac{\kappa u_* z}{\Phi_m(z)} \left(1 - 0,9 \frac{z}{H}\right)^2, & z \leq H; \\ \frac{\kappa u_* H}{\Phi_m(z)} \cdot 10^{-2}, & z > H; \end{cases}$$

$$K_x = c \left(\frac{\sigma_u(z)}{\sigma_w(z)} \right)^4 K_z; \quad K_y = c \left(\frac{\sigma_u(z)}{\sigma_w(z)} \right)^4 K_z.$$

В расчетах учитывают шероховатость z_0 , динамическую скорость u_* , высоту пограничного слоя H , масштаб длины Монина—Обухова L [14]. Коэффициенты турбулентной диффузии и компоненты скорости ветра используются при решении уравнения (2). Результатом решения является пространственно-временное поле концентрации радиоактивного вещества в атмосфере.

Структура интегрированной системы и принцип работы. Система ПАРРАД состоит из трех основных блоков (рис. 1):

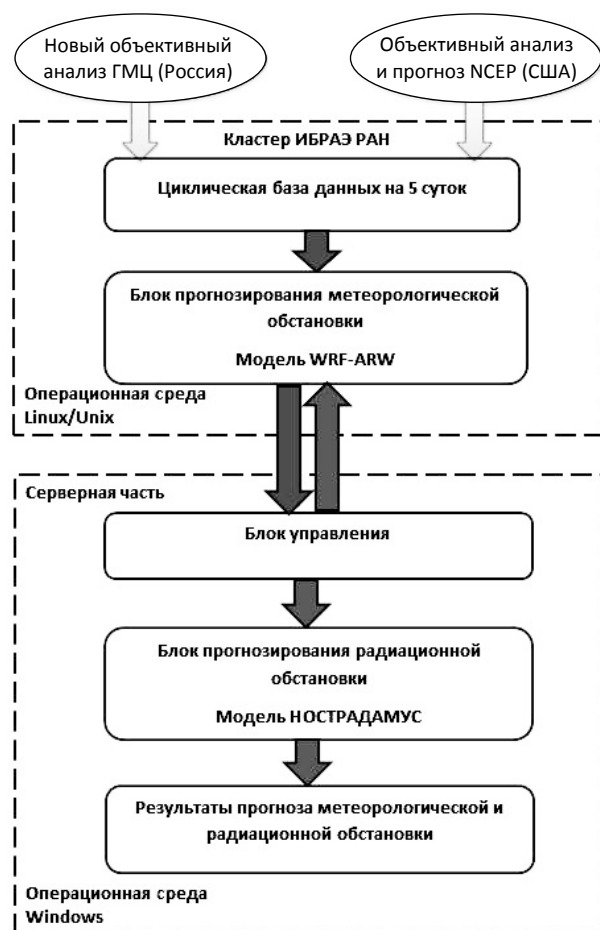
прогнозирование метеорологической обстановки (поля ветра, температуры, давления, осадки) с помощью гидродинамической негидростатической региональной модели WRF-ARW;

прогнозирование радиационной обстановки (поля концентрации, мощность дозы, дозовые нагрузки на население, выпадения) с помощью специальной версии транспортной модели НОСТРАДАМУС;

управление расчетом, обработка и обмен данными между блоками. Система подготовки исходных данных и представления результатов.

Для блока прогнозирования метеорологической обстановки необходимы начальные данные и краевые условия, которые могут быть двух типов:

объективный анализ ГМЦ (Гидрометцентр, Россия), проводимый 4 раза в сутки, и прогнозы по глобальной полулагранжевой глобальной модели ПЛАВ [15];



Р и с. 1. Структура системы ПАРРАД

объективный анализ и прогноз NCEP (Национальный центр прогнозирования поведения окружающей среды, США), получаемый по интернету 4 раза в сутки [16].

Выбор и хранение начальных данных и краевых условий обеспечиваются с помощью специальной базы данных.

Запуск модели WRF-ARW в среде Unix на кластерной вычислительной установке осуществляется с помощью блока управления (серверная часть) из среды Windows путем отправки на SFTP-сервер на кластерной установке текстового файла, который содержит основные параметры моделирования для расчетной области. В течение 1 мин после поступления файла с параметрами на SFTP-сервер происходит запуск модели WRF-ARW. По окончании работы блока прогнозирования метеорологической обстановки на SFTP-сервере появляются файлы, содержащие прогностические поля метеорологических параметров как в числовом, так и в графическом виде. Затем с помощью блока управления (серверная часть) можно выполнить

выгрузку файлов с прогностическими метеорологическими полями на сервер в среде Windows.

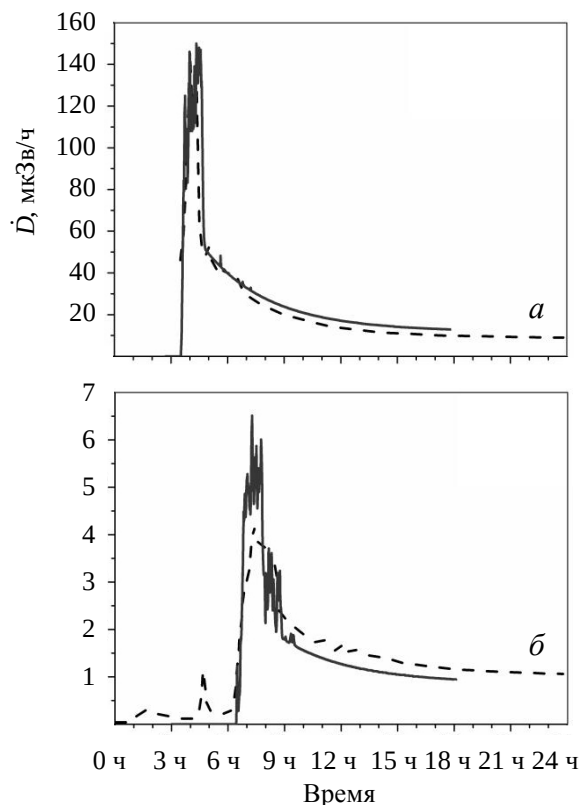
Для работы блока прогнозирования радиационной обстановки необходимо выполнить процедуру конвертации файлов с полями метеорологических параметров в формат, воспринимаемый транспортной моделью. После ввода данных об источнике выброса моделируется распространение радиоактивных веществ.

Результатом работы системы является отчет, содержащий динамику метеорологической и радиационной обстановки в течение 48 ч со времени предполагаемого выброса радиоактивных веществ. В отчете представлены обстановка на местности размером 100 на 100 км от источника выброса со скважностью от 1 до 12 ч и рекомендации по мерам защиты населения согласно НРБ-99/2009.

Система прогнозирования ПАРРАД работает в операционных средах Windows и Linux/Unix. Взаимодействие двух операционных сред осуществляется с помощью специальных интерфейсов обмена данными. Кроме технической реализации, важнейшей характеристикой, определяющей работоспособность системы ПАРРАД, является точность прогнозирования. Учесть все факторы, влияющие на точность, не всегда возможно. Поступление данных метеонаблюдений с постов, расположенных в зоне прогнозирования системы, и учет данных стандартных метеонаблюдений вблизи источника выброса являются одним из механизмов повышения точности прогноза.

Необходимо отметить, что прогноз радиационной обстановки не является статистической величиной, т.е. не учитывает возможные неопределенности или ошибки, связанные с исходными метеорологическими параметрами и оценкой источника выброса.

Испытания системы ПАРРАД на производственных областях. Одним из первых примеров использования подхода, заложенного в систему ПАРРАД, была оценка возможного источника выброса радиоактивных веществ при аварии на АЭС «Фукусима». Для оценки была использована конфигурация модели WRF-ARW с пространственным разрешением 10 км, расчетной областью 300 на 300 км и частотой выдачи прогностических полей 10 мин. В качестве начальных данных использовали анализ, для граничных условий — прогноз NCEP. Сопоставление



Р и с. 2. Измеренная (---) и прогнозируемая (—) мощность дозы в 10 (а) и 120 км (б) от АЭС «Фукусима» (Япония) 15 марта 2011 г.

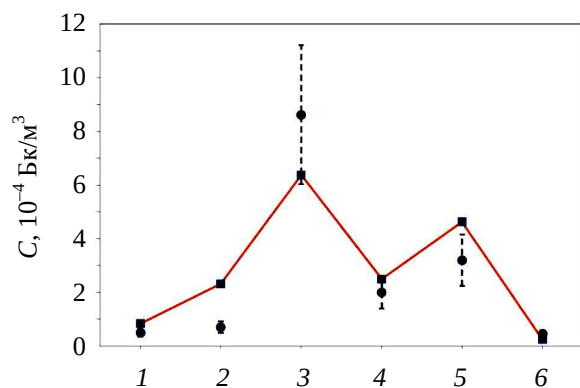
прогноза радиационной обстановки с измерениями мощности дозы внешнего облучения на местности и выпадений ^{137}Cs показало, что оценка источника выброса в целом соответствует наблюдаемой радиационной обстановке на местности [5]. На рис. 2 видно, что чем ближе точка к источнику выброса, тем меньше разница между прогнозом и измерениями. Из анализа следует, что прогноз качественно совпадает с измерениями, по количественной оценке разница не превышает 50% (см. таблицу).

Выпадения ^{137}Cs вблизи точек контроля радиационной обстановки, МБк/м²

Точка контроля	Прогноз	Измерения
АЭС «Фукусима-2»	0,4	0,5
Ибараки	0,1	0,1
Точка 32	3,8	6,4
Фукусима	0,2	0,3
Итате	1,9	1,1
Точка 83	7,4	11,1

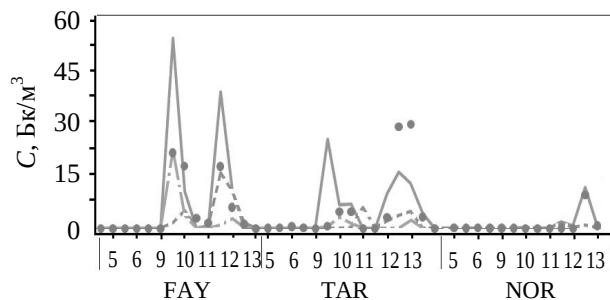
Систему ПАРРАД использовали также для прогноза радиационной обстановки при инциденте в г. Электростали в 2013 г. Для прогнози-

рования была создана конфигурация модели WRF-ARW с пространственным разрешением 18 км и временным шагом выдачи результатов 1 ч, расчетная область — 1000 на 1000 км. Расчетная область по вертикали была разбита на 41 уровень, 15 уровней расположены в планетарном пограничном слое атмосферы до уровня 850 гПа. Начальными и граничными условиями служили прогнозы NCEP с горизонтальным разрешением около 50 км. Прогнозы проводили с 3 по 13 апреля 2013 г. на период до 5 сут. Источником выброса были аэрозоли ^{137}Cs , которые распространились на большую территорию и достигли Скандинавских стран. Выпадения были ничтожно малы и не повлияли на радиационную обстановку. Однако системы мониторинга зафиксировали значительное превышение фоновой объемной активности на обширной территории. С помощью системы ПАРРАД были установлены траектория движения аэрозольного облака, предположительное время выброса, объемная активность, мощность дозы и доза внешнего облучения. На рис. 3 видно, что прогноз объемной активности согласуется с измерениями с учетом погрешности (не более 30%) и подтверждается реальной радиационной обстановкой на всей территории европейской части нашей страны. По результатам прогноза с помощью системы ПАРРАД можно сделать вывод, что вклад инцидента в мощность дозы в 100 тыс. раз ниже уровня естественного радиационного фона, что намного меньше погрешности измерений мощности дозы. При этом максимальный вклад в годовую дозу ^{137}Cs от рассматриваемого инцидента не превысил 1 нЗв [10].



Р и с. 3. Прогнозируемая (■) и измеренная объемная активность (●) ^{137}Cs в Одинцовском районе Московской области (1), Обнинске (2), зоне наблюдения Калининской (3) и Ленинградской АЭС (4), Санкт-Петербурге (5) и Хельсинки (6)

Представляет интерес использование системы ПАРРАД для прогноза радиационной обстановки при технологических выбросах на предприятиях атомной промышленности. Примером является верификация на данных выброса ^{85}Kr на заводе по переработке отработавшего ядерного топлива при извлечении топлива из твэлов. Данная ситуация лежит в основе натурального эксперимента ACURATE 1982—1983 гг. [11]. Источник выброса в эксперименте размещался на территории завода, расположенного на восточном побережье США, в штате Южная Каролина. Выброс ^{85}Kr периодически проводился с высоты 62 м с марта 1982 по сентябрь 1983 г. В ходе эксперимента измеряли объемную активность в воздухе на пяти станциях, удаленных от источника выброса на расстояние 300—1000 км. Для прогнозирования использовали конфигурацию модели WRF-ARW с полями реанализов NARR (Северо-Американский региональный реанализ) и ECMWF (реанализ Европейского центра среднесрочных прогнозов). Поля NARR имеют разрешение по горизонтали 32 км, 29 уровней по вертикали и интервал по времени 3 ч. Метеорологические поля ECMWF доступны с горизонтальным разрешением 80 км на 60 уровнях и с трехчасовым интервалом по времени. Соответственно те же данные были использованы в качестве граничных условий. Результаты прогноза по транспортной модели системы ПАРРАД сравнивали с моделями HYSPLIT [1] и FLEXPART [2]. На рис. 4 видно, что все три транспортные модели в большинстве случаев улавливают момент зарегистрированного на измерительных станциях увеличения концентрации ^{85}Kr в атмосфере. На основе количественного статистического анализа соответствия модельных данных с измерениями [17] было установлено, что транспортная модель системы



Р и с. 4. Средняя за 12 ч прогнозная объемная активность ^{85}Kr на высоте 2 м на станциях наблюдений FAY, TAR и NOR, рассчитанная с помощью системы ПАРРАД (—), FLEXPART (---) и HYSPLIT (- · -) для метеорологических полей NARR и измеренная (●)

ПАРРАД наилучшим образом воспроизводит динамику выброса и распространения трассера по сравнению с другими моделями. Однако, как видно на рис. 4, прогноз может отличаться от измерений в 2—3 раза. Такая абсолютная ошибка не снижает значимость результата и считается приемлемой при моделировании распространения примеси на такое значительное расстояние.

Заключение. Таким образом, систему ПАРРАД, моделирующую перенос радиоактивных веществ в атмосфере на основе прогностических полей метеорологических параметров высокого пространственно-временного разрешения, можно использовать для прогнозирования радиационной обстановки, а также при проведении учений и тренировок на радиационно опасных объектах. В частности, ее использовали в 2015 г. при проведении командно-штабных учений в НИИАРе и во время комплексных противаварийных учений на Ленинградской АЭС.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 14-08-01105.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Draxler R.** HYSPLIT-4. User's Guide. NOAA Techn. Memo. ERL ARL-230. 1995. 35 p.
2. **Brioude J., Arnold D., Stohl A. e.a.** The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1. — *Geosci. Model Dev.*, 2013, v. 6, p. 1889—1904.
3. **Беликов В.В., Головизнин В.М., Катышков Ю.В. и др.** НОСТРАДАМУС — компьютерная система прогнозирования радиационной обстановки. Верификация модели атмосферного переноса примеси. — *Труды ИБРАЭ. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде*. М.: Наука, 2008, с. 41—103.
4. **Беликов В.В., Сорокикова О.С., Чернов С.И. и др.** Физическое моделирование атмосферного переноса чернобыльских выпадений: Препринт IBRAE-2002-08, 2002. 23 с.
5. **Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Припачкин Д.А. и др.** Оценка выброса радионуклидов при аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония). — *Атомная энергия*, 2012, т. 112, вып. 3, с. 159—163.
6. **Skamarock W., Klemp J., Dudhia J. e.a.** Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, 2008. 520 p.
7. **Nakanishi M., Niino H.** Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. — *J. Meteor. Soc. Japan*, 2009, v. 87, p. 895—912.
8. **Sofiev M., Siljamo P., Valkama I. e.a.** A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data. — *Atmos. Environ.*, 2006, v. 40, p. 674—685.
9. **Рубинштейн К.Г., Набокова Е.В., Игнатов Р.Ю. и др.** Испытание комплекса динамической модели прогноза погоды и лагранжевой модели атмосферной дисперсии на данных натурных экспериментов. — *Метеорология и гидрология*, 2013, № 2, с. 25—38.
10. **Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Сорокикова О.С. и др.** Трансграничный перенос при малых выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. — *Атомная энергия*, 2014, т. 117, вып. 2, с. 109 — 112.
11. **Draxler R.** Demonstration of a global modeling methodology to determine the relative importance of local and long-distance sources. — *Atmos. Environ.*, 2007, v. 41, p. 776—789.
12. **Бызова Н.Л., Шнайман В.А., Бондаренко В.Н.** Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным. — *Метеорология и гидрология*, 1987, № 11, с. 75—83.
13. **Методика** расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. РД 2.18.717—2009. М., Росгидромет, 2009. 113 с.
14. **Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргрэп Е.К.** Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 263 с.
15. **Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г.** Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ. — *Труды Гидрометеорологического научно-исслед. центра Российской Федерации*, 2011, № 346, с. 145—154.
16. **Kanamitsu M.** Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. — *Weather and Forecasting*, 1991, т. 6, № 3, p. 425—435.
17. **Draxler R., Heffter J., Rolph G.** DATEM. Data Archive of Tracer Experiments and Meteorology 23 July 2002, APPENDIX B, 2002, p. 18—20.

Поступила в Редакцию 12.02.16

УДК 618.14+533.9.01

МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЗРЫВОВ

*Котов Ю.Б. (ИПМ им. М.В. Келдыша, г. Москва),
Семенова Т.А., Федоров В.Ф. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)*

Микроволновый мониторинг атмосферы методами пассивной радиолокации может быть использован для регистрации ядерных взрывов. К настоящему времени исследованы основные

механизмы генерации сверхвысокочастотного импульса ядерного взрыва и проведены моделирующие эксперименты [1—4] по регистрации в миллиметровом диапазоне излучения молний,