

ми броуновских частиц агрегат согласно законам гидродинамики стремится к своему росту, втягивая все новые свободные клетки. Полученные при таком моделировании значения по порядку величины близки к наблюдаемым в эксперименте. В дальнейшем можно сделать модель еще более реалистичной, учитывая вязкость реальной питательной среды, адгезивные свойства клеток на разных ростовых поверхностях, упругость клеток и т. п.

Результаты исследований, полученные с помощью компьютерного видеоконтекста «Цитомир», используются в учебном процессе при чтении лекций в магистратуре Института подготовки научных кадров НАН Беларуси. На их основе разработаны учебно-методические пособия и методические рекомендации; они использованы в соответствующих электронных учебно-методических комплексах, зарегистрированных в Государственном регистре информационных ресурсов.

Экспериментальные результаты, представленные в статье, были получены при участии кандидатов биологических наук И. И. Конево́й, С. Н. Шевцовой, аспиранток А. С. Сапун, Н. А. Балашенко. Авторы выражают им искреннюю благодарность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Pawley, J. B.* Handbook of Biological Confocal Microscopy. – 3<sup>rd</sup> ed. / J. B. Pawley. – Berlin : Springer, 2006. – 985 p.
2. *Dromashko, S. E.* Time-laps microscopy of living cells with video complex «Tsitomir»: scientific, medical, and ecological possibilities / S. E. Dromashko, et al. // *Biologija (Lithuania)*. 2018. – Vol. 64. – No. 3. – P. 208–216.
3. *Шейко, Я. И.* Видеомикроскопия живых клеток *in vitro* с помощью видеоконтекста «Цитомир»: метод. рек. / Я. И. Шейко и др. – Минск: ООО «Поликraft», 2014. – 46 с.
4. *Rubin, H.* The role of selection in progressive neoplastic transformation / H. Rubin // *Adv. Cancer Res.* – 2001. – Vol. 83. – P. 159–207.
5. *Дромашко, С. Е.* Долговременная компьютерная видеомикроскопия живых клеток: моделирование «метастазирования» / С. Е. Дромашко, С. П. Фисенко // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 2 / под общ. ред. А. А. Большакова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – С. 93–96.

## ТЕХНОЛОГИЯ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ ДОПЛЕРОВСКОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ЛОКАТОРА В МЕЗОМАСШТАБНУЮ ЧИСЛЕННУЮ МОДЕЛЬ WRF-ARW В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

### ASSIMILATION TECHNOLOGY OF DOOPLER WEATHER RADAR DATA INTO MESOSCALE NUMERICAL WRF-ARW MODEL IN THE REPUBLIC OF BELARUS

**П. О. Зайко**

**P. A. Zaiko**

*Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения  
и мониторингу окружающей среды, г. Минск, Республика Беларусь*

*Polly\_LO@tut.by*

*Center of hydrometeorology, control of radioactive contamination and environmental monitoring  
of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

Представлено описание основных методов, применяемых для усвоения данных дистанционного зондирования, в том числе данных метеорологических локаторов, в численные модели прогноза погоды в мировой практике. Представлены результаты создания первого компонента системы усвоения данных наземных и аэрологических наблюдений в мезомасштабную модель WRF в Белгидромете. Дается более детальное описание этапов технологического процесса усвоения данных доплеровского метеорологического локатора на примере метеорологического локатора Минск-2. Особое место в работе занимает описание технологии усвоения радиолокационной отражаемости и радиального ветра в мезомасштабную численную модель WRF (WRF-ARW) на основе метода трехмерного вариационного усвоения (3D-Var). Приводятся результаты статистической оценок прогнозов погоды модели WRF с усвоенными радиолокационными данными за 2017 г.

The abstract presents the description of the basic methods of assimilation of remote sensing data, including Doppler weather radar data, into numerical weather prediction models in world practice. The abstract presents the first component of data assimilation system of surface meteorological and aerological observations, which is developed in the Belhydromet of the Republic of Belarus, into the mesoscale numerical model WRF (WRF-ARW). Additionally, there is a more detailed description of the stages of the technological process of the assimilation of Doppler meteorological radar, on the example of Minsk-2 weather radar. The description of the assimilation technology of horizontal radar reflectivity and radial velocity into mesoscale weather prediction model WRF (WRF-

ARW) based on the three-dimensional variational method (3D-Var) is a special part of the work. Also, the results of statistical verification of weather forecasts of the WRF model, with assimilated radar data for 2017 g. are presented in the work.

*Ключевые слова:* прогноз погоды, WRF-ARW, система усвоения данных метеорологических локаторов, объективный анализ, оценка.

*Keywords:* weather forecast, WRF-ARW, Doppler weather radar data assimilation system, objective analysis, verification.

Основной целью работы является улучшение качества прогнозов сильных осадков на территории Республики Беларусь, получаемых с помощью системы мезомасштабного прогнозирования на основе численной модели WRF-ARW за счет уточнения полей начального состояния модели с помощью данных доплеровских метеорологических локаторов. Основной метод, позволяющий уточнить и скорректировать поля исходных данных, – это усвоение или ассимиляция данных.

Усвоение данных – процесс определения наиболее точной оценки текущего состояния атмосферы за счет привлечения дополнительных метеорологических наблюдений. Качество усвоения данных во многом определяет точность последующего прогноза. Реализация процесса усвоения проводится с помощью различных математических методов и представляет собой процесс слияния данных наблюдений с прогностическим решением гидродинамической модели. В процессе усвоения производится контроль качества поступающих наблюдений, корректировка полей начальных данных с помощью математических методов, а также согласование полей.

Задача ассимиляции данных для мезомасштабных численных моделей прогноза погоды имеет некоторые отличия от усвоения в глобальных масштабах. Увеличение разрешения численной модели требует более плотной сети наблюдений с подходящими временными и пространственными разрешениями. Учитывая то, что точный прогноз конвективных явлений это одна из основных задач прогноза погоды, эти наблюдения должны быть непосредственно связаны с конвективными явлениями.

Первый этап разработки комплексной системы усвоения метеорологических данных в Белгидромете был начат в 2016 г. В рамках него проводились работы по совершенствованию качества прогнозов системы мезомасштабного прогнозирования на основе численной модели WRF-ARW, за счет внедрения методов усвоения (ассимиляции) данных и привлечения дополнительных источников наземных метеорологических и аэрологических наблюдений.

В 2017 г. в Белгидромете Республики Беларусь в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка базовых элементов технологии мезопрогнозирования элементов погоды по территории Республики Беларусь на основе усвоения данных в численной модели WRF» была разработана и введена в опытную эксплуатацию автоматизированная система усвоения наземных метеорологических и аэрологических данных наблюдений (OBS\_WRF) [4].

Процесс усвоения дополнительных метеорологических данных достаточно сложен, поскольку обусловлен разнообразием видов наблюдений (от дополнительных наземных до спутниковых и радиолокационных). Каждый из видов данных имеет свои особенности: информация передается в специальных кодах (KH-01, KH-04, HDF5), наблюдения производятся на различных уровнях и с различным временным интервалом. В связи с этим процесс разработки компонентов системы усвоения был разделен на несколько этапов: усвоение наземных и аэрологических наблюдений и усвоение дистанционных методов.

Разработанная автоматизированная система позволила уточнить поля объективного анализа и прогноза, используемые в качестве исходных данных для модели WRF, за счет привлечения региональных данных с территории Европы (более 1500 синоптических и аэрологических станций) за срок наблюдений 06 UTC. Следовательно, получить уточненный прогноз модели WRF за исходный срок 00 UTC раньше следующего глобального прогноза, который доступен позже 06 UTC. Исходный срок глобального прогноза определяется сроком метеорологических наблюдений, привлекаемых в качестве исходных для моделирования, но для анализа всех поступивших видов наблюдений и последующего моделирования состояния атмосферы много времени, за счет этого формируется «окно» позволяющее уточнить прогноз за последний основной исходный срок (00, 06, 12, 18 UTC).

Основными компонентами автоматизированной системы являются: автоматизированная система контроля, подготовки и хранения данных метеорологических наблюдений (давление на уровне моря и станции, температура и точка росы, скорость и направление ветра; данных аэрологических наблюдений: абсолютная высота изобарических поверхностей 1000, 850, 700, 500гПа и др., температура, дефицит точки росы, скорость и направление ветра на соответствующих изобарических поверхностях). А также последующее формирование файлов с данными наблюдений в специальном формате LITTLE\_R, требуемом системой усвоения (OBSGRID); автоматизированная система контроля и объективного анализа, позволяющая произвести усвоение наблюдений в численную мезомасштабную модель на основе метода полиномиальной аппроксимации (метод Крессмана); комплекс мезомасштабного численного прогнозирования на основе модели WRF, включающую счет мезомасштабной модели WRF с блоком усвоения данных за срок 06 UTC, постобработку результатов прогноза. Кроме того, для контроля работы в систему дополнительно включен комплекс программ статистической оценки и визуализации результатов прогноза с усвоенными метеорологическими параметрами.

В результате работы система позволила получить уточненные прогнозы за 00 UTC, до поступления нового глобального прогноза за 06 UTC, и улучшить показатели оправдываемости прогноза основных метеорологических величин (давление, количество осадков) на ранних сроках моделирования. Доля правильных прогнозов осадков с ассимилированными данными составила 82 % на территории Республики Беларусь на 12 UTC. Критерий Пирси–Обухова – 0,66. Это свидетельствует о практической значимости прогноза осадков с усвоенными данными.

Второй этап разработки системы начался в 2017 г. В рамках данного этапа проводилась разработка и тестирование системы усвоения данных дистанционного зондирования (радиолокационных) как компонента системы мезомасштабного прогнозирования на основе численной модели WRF-ARW и системы усвоения наземных и аэрологических данных. Кроме того, изучались наиболее современные методы ассимиляции, с последующей их оценкой на возможность внедрения в оперативную информационную систему Белгидромета.

Мировой опыт разработки и применения моделей численного прогноза погоды показал, что ассимиляция дополнительных метеорологических характеристик в поля начального состояния модели является одним из наиболее эффективных методов улучшения показателей оценок прогнозов мезомасштабных численных моделей прогноза погоды. На сегодняшний день наиболее совершенными способами ассимиляции метеорологических данных, применяемыми в ведущих мировых центрах, являются метод трехмерного (3D-Var) и четырехмерного вариационного усвоения (4-D-Var), метод основанный на фильтре Калмана, гибридные вариационно-ансамблевые методы [3].

Особое значение для таких мезомасштабных численных моделей, как WRF-ARW, имеет усвоение данных доплеровских метеорологических локаторов. В Республике Беларусь есть 3 метеорологических локатора (Минск-2, Гомель, Брест), а также идут работы по введению в эксплуатацию доплеровского метеорологического локатора Витебск. На сегодняшний день доплеровские метеорологические локаторы позволяют получить данные о распределении поля ветра и влагосодержании в облаках в зоне обзора, а также зафиксировать наличие опасных конвективных систем на территории Республики Беларусь с высоким временным и пространственным разрешением. Эти виды данных успешно применяются для уточнения начальных полей для численных моделей прогноза погоды через системы ассимиляции данных. Все данные белорусских доплеровских локаторов планируется использовать в системе ассимиляции в полном объеме.

В 2019 г. в Белгидромете Республики Беларусь начаты работы по тестированию разработанной технологии, позволяющей усвоение данных доплеровских метеорологических локаторов. Основными этапами работы технологии являются:

- проведение фильтрации объемов радиолокационных данных для удаления аномалий радио-эха (дополнительные электромагнитные помехи, рефракция, фильтрация птиц, насекомых, шумов и т. д.);
- преобразование данных радиолокационных наблюдений (отражаемости и радиального ветра) из исходных форматов (OdimH5) в форматы, применяемые в системе ассимиляции данных 3D-Var (LITTLE\_R);
- подготовка полей прогноза модели WRF для усвоения (расчет матрицы ошибок, подготовка файлов начальных и граничных условий и т. д.);
- усвоение радиолокационных данных методом трехмерного вариационного усвоения (3D-Var), расчет минимума функционала;
- обновление данных начальных и граничных условий для расчета модели WRF;
- расчет прогноза мезомасштабной численной модели WRF с усвоенными радиолокационными наблюдениями.

Технология усвоения данных локатора имеет некоторые особенности, в связи с необходимостью достаточно узкоспециализированной первичной подготовки самих данных (фильтрация помех, расчет ошибок) и последующего преобразования их в форматы систем ассимиляции данных. Для создания компонента системы по подготовке радиолокационной информации были использованы специализированные библиотеки по обработке радиолокационных данных wradlib, netcdf, а также разработаны специализированные программы на Python 2.7, позволяющие провести обработку отражаемостей и скоростей относительно уровня, произвести перерасчет координат и сформировать файл, требуемый для усвоения системой ассимиляции WRFDA. В качестве основного метода усвоения был выбран метод трехмерного вариационного усвоения, позволяющий усваивать как наземные, так и дистанционные наблюдения. В системы ассимиляции мезомасштабной модели WRF данный метод имеет название 3D-Var [2].

Суть метода трехмерного вариационного усвоения заключается в минимизации функционала от искомого вектора состояния системы  $X$ . Причем этот функционал выбирается так, чтобы отражать степень несогласованности  $X$  с имеющейся как наблюдательной, так и прогностической информацией.

Вариационный метод усвоения данных наблюдений основан на минимизации функционала [1]:

$$J(X) = \frac{1}{2} (X - X^f)^T B^{-1} (X - X^f) + \frac{1}{2} (X^{obs} - HX)^T R^{-1} (X^{obs} - HX), \quad (1)$$

где  $X$  – вектор, представляющий искомое поле (состояние атмосферы на сетке в момент анализа);

$X^f$  – поле прогноза по гидродинамической модели атмосферы;

$X^{obs}$  – вектор наблюдений;

$B$  – матрица ковариаций ошибок прогноза;

$R$  – матрица ковариаций ошибок наблюдений;

$H$  – оператор наблюдений, связывающий наблюдения с истинным состоянием атмосферы;

$$X^{obs} = HX + \eta, \quad (2)$$

где  $\eta$  – вектор ошибок наблюдений.

Основное преимущество метода 3D-VAR на практике состоит в возможности прямого усвоения радиолокационных и спутниковых наблюдений. Стоит отметить, что для практической реализации технологии в оперативной работе необходимо накопить достаточный объем прогнозов модели, что даст возможность корректного расчета фоновых ошибок и построения матрицы [5].

Для предварительной оценки работы технологии усвоения радиолокационных данных были выбраны случаи фиксации доплеровским метеорологических Минск-2 сильных ливневых осадков и гроз на территории Республики Беларусь в 2017 г. В работе приводится сравнение параметров статистической оценки результатов прогнозов системы мезомасштабного прогнозирования WRF с усвоенными радиолокационными данными и без усвоения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Инатова, В. М., Шутяев, В. П.* «Алгоритмы и задачи ассимиляции данных для моделей динамики атмосферы и океана. Научно-образовательный курс». [Электронный ресурс]. URL: <https://mipt.ru/education/chaix/mathematics/upload/99f/algsaasimulation.pdf>.
2. *Wang, H., Huang, X.-Y., Xu, D. and Liu, J.* (2014) A scale-dependent blending scheme for WRFDA: impact on regional weather forecasting. *Geoscientific Model Development*, 7, 1819–1828. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1819-2014>.
3. *Gustafsson, N., Janjic, T., Schraff, C., et al.* Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Q J R Meteorol Soc.* 2018;144:1218–1256. <https://doi.org/10.1002/qj.3179>
4. *Skamarock, W. C., et al.* A description of the Advanced Research WRF Version 3: NCAR Techn. Note/ ed.: Skamarock W.C. et al. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008. – 125 p.
5. *Ballard, S. P., Li, Z., Simonin, D. and Caron, J.-F.* Performance of 4D-Var NWP-based nowcasting of precipitation at the Met Office for summer 2012 // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* – 2016. –No. 142. – P. 472–487. <https://doi.org/10.1002/qj.2665>.

## ПИЛОТНАЯ ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

### PILOT ONTOLOGICAL MODEL OF BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

***В. А. Иванюкович, В. В. Белая***

***U. Ivaniukovich, V. Belaya***

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова,  
г. Минск, Республика Беларусь  
u.ivaniukovich@gmail.com*

*Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus*

Предлагается создать онтологическую модель, описывающую термины и понятия в области ядерных наук и технологий, на базе тезауруса Международной ядерной информационной системы ИНИС. Основная задача, на которую ориентирована модель, – улучшение инструментов обработки входных данных и поиска информации в хранилищах системы с использованием браузеров. Онтологическая модель может быть использована и для решения других задач, связанных с обработкой ядерной информации.

It is proposed to create an ontological model describing terms and concepts in the field of nuclear science and technologies, which is based on the thesaurus of the International Nuclear Information System (INIS). The model is focused on improving of the input data processing as well as increasing efficiency information retrievals in the data store at using of browsers. The ontological model can be used also to solve other problems related to the processing of nuclear information.

*Ключевые слова:* онтология, предметная область, ядерные науки, ядерные технологии, тезаурус, библиографические информационные системы, ИНИС

*Keywords:* ontology, subject field, nuclear sciences, nuclear technologies, thesaurus, subject categories, bibliographical information systems, INIS

Онтология, или формальное описание терминов и понятий предметной области и отношений между ними, набирает популярность и расширяет сферу использования в информатике. Онтология является мощным инструментом искусственного интеллекта и все чаще используется в различных информационных технологиях (интернет, поисковые системы и т. п.), а также специалистами в предметных областях для формального описания терминов и отношений между ними. Например, очень удобны онтологии для описания содержания учебных дисциплин