

Введение

Численные методы прогнозов – это интенсивно развивающееся и перспективное направление в прогностической метеорологии. Основой для таких методов прогноза являются гидродинамические модели атмосферы. По масштабу, а также учету региональных и географических особенностей, модели можно разделить на глобальные и мезомасштабные.

К первым относятся такие модели как GFS – Global Forecast Model (NCEP) [1], ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [2], Глобальная оперативная спектральная модель, модель ПЛАВ (Глобальная гидродинамическая полулагранжева модель) [3] и др. Выходные данные таких моделей – это прогностические поля по территории всего земного шара или полушария, построенные на регулярной широтно-долготной сетке с шагом от 0.25 до 1.2 градуса. Таким образом, максимальное разрешение для шага 0.25 градуса – это около 27 км.

В мезомасштабных моделях учитываются региональные синоптические процессы, обусловленные локальными особенностями. К мезомасштабным моделям относятся международная модель COSMO (Consortium for Small-scale Modeling) [4] и WRF (Weather Research Forecasting Model) [5]. Модель WRF – это opensource продукт, что подразумевает полный свободный доступ к исходным кодам модели, постоянную работу сообщества разработчиков по поддержке, обновлению и разработке новых инструментов, что делает ее особенно привлекательной для исследований.

Для экспериментального моделирования метеорологических процессов, а также процессов трансформации и переноса вредных примесей в атмосфере наиболее удобным и доступным инструментом является модель WRF, включающая блок подготовки и расчета данных переноса примесей WRF-CHEM. В качестве актуальных задач моделирования загрязнения атмосферного воздуха можно выделить региональное моделирование в масштабе административной области или нескольких областей, и моделирование в масштабах города.

В обоих случаях актуальна задача количественной оценки значений эмиссий. Закрытость количественных оценок выбросов вредных веществ промышленными предприятиями и редкая сеть официальных наблюдательных пунктов обуславливает необходимость поиска способов косвенной оценки эмиссии газов.

Описание модулей и подсистем

Для выполнения проекта была установлена модель WRF 3.5.1. с расширением Chemistry 3.5.1. Система подготовки исходных полей эмиссий PREP-CHEM prep_chem_sources_v1.3_08.

Блок-схема моделирования представлена на рисунке 1. WPS – модуль предобработки прогностических данных GFS в формате grib. Модуль включает в себя три утилиты подготовки данных:

1. geogrid – определение горизонтального домена модели, интерполяция статических данных (гео-данные), приведение их к WRF I/O API.
2. ungrib – декодирование входных данных grib, использование таблиц декодировки соответствующего параметра, поддержка изобарических и общих вертикальных координат, преобразование данных во внутренний промежуточный формат.
3. metgrid – усвоение статических данных, исходных метеорологических данных, горизонтальная интерполяция метеорологических полей, приведение к формату WRF I/O API.

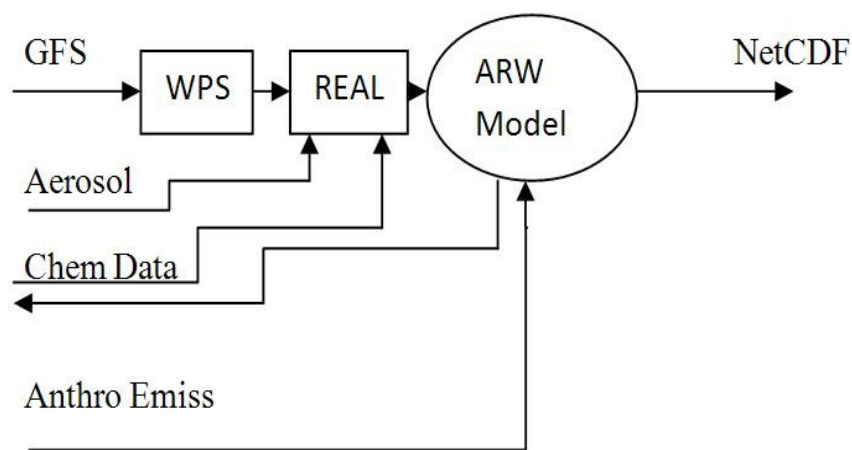


Рисунок1. Блок-схема WRF-CHEM

Подготовленные данные поступают на вход модуля REAL – модуль инициализации входных данных модели, где обеспечивается усвоение метеорологических, статических и химических полей, приведение их к единому модельному разрешению. Здесь же происходит усвоение выходных данных химического блока предыдущего расчета.

Модуль PREP_CHEM осуществляет подготовку входных данных эмиссий. Разработана технология и программные модули корректировки и подготовки исходных данных эмиссий, что предоставляет возможность корректировать значения эмиссий в узлах сетки (по умолчанию используются исходные данные используя усредненные значения многолетних наблюдений (EDGAR, RETRO)).

Выходные данные модели – это набор прогностических полей в формате netcdf. Технологическая цепочка составлена из следующих модулей:

- Подсистема загрузки начальных условий.
- Подсистема конфигурации параметров модели.
- Подсистема подготовки эмиссий.
- Подсистема запуска и сопровождения расчетов модели.
- Подсистема поспроцессинга.
- Подсистема технологического веб-интерфейса.

Подсистема загрузки начальных условий

Начальные условия автоматически загружаются с серверов NCEP по протоколу ftp.

Практический предел сетки модели ограничен вычислительными возможностями оборудования вкпе с имеющимися в наличии данными орографии - 30 угловых секунд, что составляет немногим более 5 км на ребро ячейки.

В результате экспериментов был найден оптимальный для существующей совокупности факторов (существующая мощность вычислителя, требуемая заблаговременность и желаемый шаг сетки) шаг сетки и регион, составляющий 9 км, а также оптимальный регион домена.

Практика показывает, что для метеорологической составляющей уменьшение шага сетки до масштабов орографии уже практически нецелесообразно, однако весьма полезно для расчета распространения и переноса химических веществ. Однако эксперименты, проведенные в рамках первого и второго этапов показывают, что дальнейшее уменьшение сетки невозможно без увеличения вычислительной мощности оборудования. Уменьшение домена счета представляется нецелесообразным, т.к. данный расчетный домен включает главные источники выбросов Новосибирской области и Кузбасса, также частично

захватывает юг Томской области и север Алтайского края.

Подсистема подготовки данных эмиссий

В системе заложены значения эмиссий, указанные в листинге 1.

Листинг 1. Значения эмиссий для выбранного домена
Единица измерений mol /km2 hr

0 :	Date	Time	Name	Level	Size	Miss :	Minimum	Mean	Maximum
1 :	2014-09-15	00:00:00	E_OLT	0	11286	0 :	0.0000	0.0033779	0.44900
2 :	2014-09-15	00:00:00	E_SO2	0	11286	0 :	4.0172e-05	0.18215	89.612
3 :	2014-09-15	00:00:00	E_ORA2	0	11286	0 :	0.0000	0.0043239	0.55259
4 :	2014-09-15	00:00:00	E_CO	0	11286	0 :	0.0000	1.0123	145.22
5 :	2014-09-15	00:00:00	E_PM_10	0	11286	0 :	0.0000	0.0024660	0.35378
6 :	2014-09-15	00:00:00	E_OLI	0	11286	0 :	0.0000	0.0000	0.0000
7 :	2014-09-15	00:00:00	E_NO2	0	11286	0 :	0.0000	0.045573	5.7590
8 :	2014-09-15	00:00:00	E_ALD	0	11286	0 :	0.0000	0.0029983	0.38855
9 :	2014-09-15	00:00:00	E_ETH	0	11286	0 :	0.0000	0.025523	3.8062
10 :	2014-09-15	00:00:00	E_HC5	0	11286	0 :	0.0000	0.018400	2.6571
11 :	2014-09-15	00:00:00	E_HC3	0	11286	0 :	0.0000	0.066945	9.5821
12 :	2014-09-15	00:00:00	E_OC	0	11286	0 :	0.0000	7.1280e-05	0.0021236
13 :	2014-09-15	00:00:00	E_HC8	0	11286	0 :	0.0000	0.0040419	0.57782
14 :	2014-09-15	00:00:00	E_NH3	0	11286	0 :	0.0000	0.0000	0.0000
15 :	2014-09-15	00:00:00	E_KET	0	11286	0 :	0.0000	0.0066085	0.93145
16 :	2014-09-15	00:00:00	E_BC	0	11286	0 :	0.0000	7.5953e-05	0.0016569
17 :	2014-09-15	00:00:00	E_HCHO	0	11286	0 :	0.0000	0.0025126	0.34158
18 :	2014-09-15	00:00:00	E_CSL	0	11286	0 :	0.0000	0.0000	0.0000
19 :	2014-09-15	00:00:00	E_PM_25	0	11286	0 :	0.0000	0.00082949	0.11900
20 :	2014-09-15	00:00:00	E_TOL	0	11286	0 :	0.0000	0.0056701	0.79403
21 :	2014-09-15	00:00:00	E_ISO	0	11286	0 :	0.0000	0.0000	0.0000
22 :	2014-09-15	00:00:00	E_OL2	0	11286	0 :	0.0000	0.0000	0.0000
23 :	2014-09-15	00:00:00	E_sulf	0	11286	0 :	0.0000	0.0000	0.0000
24 :	2014-09-15	00:00:00	E_XYL	0	11286	0 :	0.0000	0.0076984	1.0694
25 :	2014-09-15	00:00:00	E_NO	0	11286	0 :	0.0000	0.16305	20.604

Источники эмиссий расположены в крупных промышленных центрах. Исходная сетка эмиссий содержит данные с разрешением 0.1 градус.

Результаты расчета

Результаты расчета представлены в виде netcdf файла, содержащего 215 параметров, представленных на 30 вертикальных уровнях. Список параметров с 1 по 152 содержит стандартные выходные метеорологические данные модели WRF. Список параметров 152-215- выходные значения химического блока.

Для расчетов в модели WRF используется сетка с перемещенным центром. Для использования в системах постпроцессинга данные должны быть перепроецированы. Перепроецирование выполняется при помощи утилиты sdo [6] при помощи служебных файлов описания сетки. В результате «интегральный» выходной файл модели преобразуется в классическую широтно-долготную сетку и разделяется по переменным, являющимися целевыми для представления в подсистеме визуализации.

Для обеспечения полного цикла создания и обработки данных создана технологическая цепочка расчета включающая:

1. Механизмы загрузки исходных данных с серверов GFS
2. Механизмы создания полей эмиссии, а также пользовательской корректировки эмиссий
3. Расчет модели на 48 часов с шагом 3 часа в заданных границах
4. Постпроцессинг данных модели: поворот, перепроецирование, выделение нулевого уровня

5. Формирование выходных файлов модели по параметрам
6. Передачу данных модели подсистеме визуализации.

Подсистема визуализации включает:

1. Систему векторной веб-визуализации данных с наложением векторных слоев-результатов расчетов.
2. Систему обработки «клика» пользователя, с выводом графиков прогноза изменения величины в ближайшем узле сетки.

Технологическая система визуализации

Технологическая подсистема визуализации данных позволяет анализировать результат расчетов, а также управлять значениями эмиссий, передающихся на вход модели. Подсистема визуализации работает на базе MapServer и предоставляет возможность отображать векторные данные-результаты расчетов прогностической модели. В виде полей значений и графиков визуализируются следующие параметры:

- T2
- SO2
- CO2
- NO2
- CO
- O3
- NO
- CH4
- PM10
- NMVOX

В правой части окна расположены кнопки управления слоями, в верхнем правом углу расположен элемент очистки всех выбранных слоев. Каждый параметр включает стопку слоев с заблаговременностью от +3 до +48 часов (выпадающий список при клике на параметр). Параметр EMIS включает исходные поля эмиссий. При выборе слоя происходит автоматическая очистка предыдущих слоев. В качестве сервисов управления картой доступно: изменение масштаба, навигация. Клик по карте вызывает появления окна подробной информации с графиком прогноза изменения выбранной величины в ближайшем узле сетки.

1. Global Forecast system (GFS) // «<http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs>» <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs> - загл. с экрана.
2. World leader in global medium-range numerical weather prediction // «<http://www.ecmwf.int/>» <http://www.ecmwf.int/> - загл. с экрана.
3. Современные прогностические модели в численных прогнозах погоды // «<http://math.tsu.ru/EEResources/mfm/index.html>» <http://math.tsu.ru/EEResources/mfm/index.html> - загл. с экрана.
4. Consortium for Small-scale Modeling // «<http://www.cosmo-model.org/>» <http://www.cosmo-model.org/> - загл. с экрана.

5. The Weather Research Forecasting Model Website // «<http://www.wrf-model.org>»

<http://www.wrf-model.org> - загл. с экрана.

6. Climate Data Operators // «<https://code.zmaw.de/projects/cdo>»

<https://code.zmaw.de/projects/cdo> - загл. с экрана.

Приложение 1

Приложение 1.

Таблица П.1. Фактически доступный перечень расчетных значений целевых параметров.

№ п/п	Наименование вещества, формула, единицы измерения	Эмиссия mol km ⁻² hr ⁻¹	Результаты ppm	Диапазон разброса min-max выходных файлов
1	Оксид азота NO, мг/м ³	+	NO	0 — 0,0145
2	Диоксид азота NO ₂ , мг/м ³	+	NO ₂	0,0-0,0386
3	Диоксид серы SO ₂ , мг/м ³	+	SO ₂	351,7 — 370,6
4	Оксид углерода CO, мг/м ³	+	CO	0,077-0,182
5	Диоксид углерода CO ₂ , мг/м ³	-	CO ₂ *	351 - 370
6	Озон O ₃ , мг/м ³	-	O ₃	0,001 — 0,0044
7	PM-10 (BC ₁₀), мг/м ³	+	PM10	0 - 3,9
8	Метан CH ₄ , мг/м ³	+	CH ₄	1,63-1,70
9	Летучие неметановые органические соединения NMVOX, мкг/м ³	NMVOX [hcho,tol,xyl,	Сумма полей hcho+tol+xyl+gly+ macr+mgly	000012-0,00052

Таблица П.2. Расширенный набор параметров, соответствующий фактически измеряемым

Наименование контролируемого параметра	Диапазон измерения	Средства контроля	WRF_CHRM
Оксид азота NO, мг/м ³	От 0,03 до 0,8	АСК	NO
Диоксид азота NO ₂ , мг/м ³	От 0,02 до 0,85	АСК	NO2
Диоксид серы SO ₂ , мг/м ³	От 0,025 до 2	АСК	SO2
Оксид углерода CO, мг/м ³	От 1,5 до 50	АСК	CO
Озон O ₃ , мг/м ³	От 0,015 до 0,5	АСК	O3
PM-10 (ВЧ ₁₀), мг/м ³	От 0,01 до 1,0	АСК	PM10
PM-2,5 (ВЧ _{2,5}), мг/м ³	От 0,005 до 0,5	АСК	PM25
Сероводород H ₂ S, мг/м ³	От 0,001 до 0,2	АСК	НЕТ
Аммиак NH ₃ , мг/м ³	От 0,02 до 0,2	АСК	NH3
Сумма углеводородов ΣСН, мг/м ³	От 15 до 100	АСК	СН4
Сероуглерод, мг/м ³	От 0,02 до 0,33	АСК/ХАЛ	НЕТ
Фенол, мг/м ³	От 0,003 до 0,100	АСК/ХАЛ	НЕТ
Метилмеркаптан, мг/м ³	(2,7·10 ⁻⁵ -1,4·10 ⁻³)	АСК/ХАЛ	НЕТ
Фторид водорода, мг/м ³	(0,002-0,170) мг/м ³	АСК/ХАЛ	НЕТ
Твердые фториды, мг/м ³		АСК/ХАЛ	НЕТ
Хлор, мг/м ³	0,012-0,030	АСК/ХАЛ	НЕТ
Хлорид водорода, мг/м ³	0,1-2,0	АСК/ХАЛ	НЕТ
Сажа, мг/м ³	0,025-1,00	АСК/ХАЛ	Суммировать поля BC1 BC2 OC1 OC2 Hydropyobic Black Carbon
ПАУ, тяжелые металлы, общая пыль		АСК/ХАЛ	Суммировать поля DUST1 0.5 um DUST2 1.4 um DUST3 2.4 um DUST4 4.5 um DUST5 8 um PAN
Летучие органические соединения		АСК/ХАЛ	Сумма hcho+tol+xyl+gly+macr+mgly