

УДК 551.509(470.55) + 504.5(470.55)

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ МОДЕЛИ АТМОСФЕРНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ г. ЧЕЛЯБИНСКА В ДНИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

*О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев*

Рассмотрены варианты расчета метеопараметров приземного слоя атмосферы г. Челябинска в период экстремально высокого загрязнения с использованием мезомасштабной модели WRF. Произведен отбор оптимального сочетания пространственных характеристик домена моделирования и физических параметризаций атмосферных процессов приземного слоя для проведения серии дальнейших вычислений, которые позволят определить характерные циркуляции и температурные условия в период неблагоприятных метеоусловий.

Ключевые слова: неблагоприятные метеоусловия, локальные циркуляции, приземный слой атмосферы, мезомасштабная модель WRF.

**1. Введение.** Наблюдаемое загрязнение атмосферы мегаполиса – это комплексный процесс, включающий выбросы промышленности и автотранспорта, их трансформацию и рассеяние под действием факторов различного пространственно-временного масштаба. Среди этих факторов выделяют неблагоприятные метеорологические условия (НМУ). Под НМУ подразумевают синоптические циркуляционные системы с горизонтальными размерами порядка 1000 км, которые способствуют накоплению примесей в нижней части пограничного слоя атмосферы из-за формирования инверсионных слоев, неблагоприятных скоростей и направления ветра на высоте источников выбросов, некоторых видов атмосферных осадков и др. Роль местных локальных циркуляций масштаба 10–100 км в переносе и трансформации примесей обычно менее изучена. Безусловно, формирование местных циркуляций происходит в первую очередь под влиянием крупных форм местного рельефа и особенностей регионального землепользования с характерным масштабом в несколько десятков км. С другой стороны, на масштабах от 1 до нескольких км для распространения загрязнений важным являются взаимное расположение промышленных, селитебных, зеленых зон, городских водоемов, объектов дорожной инфраструктуры, высота и плотность застройки, интенсивность выбросов тепла и влаги и другие особенности городской среды. В целом, эти термомеханические особенности города определяют неповторимое пространственное распределение приземных температур и приземного ветра, которые, в свою очередь, определяют форму и интенсивность циркуляций

городского острова тепла (в том числе характерного для Челябинска [1]) и других возможных явлений (н.п. струя нижних уровней, городской бриз и т.п.) В ситуации, когда пространственно-временное разрешение численных мезомасштабных моделей существенно превосходит разрешение сети метеорологических и экологических наблюдений, мы предположили, что анализ модельных полей высокопространственного разрешения в дни с экстремальным загрязнением воздушной среды позволит сделать заключение о роли локальных циркуляций в эволюции пограничного слоя атмосферы и переносе атмосферных примесей по территории города Челябинска.

Продолжая исследования [1, 2], с использованием мезомасштабной модели WRF, в задачи данной работы входили оценка и отбор оптимальной конфигурации модели (п. 2) для исследования атмосферного приземного слоя г. Челябинска, описание выборки случаев экстремального загрязнения (СЭЗ), адекватной для тестирования модели (п. 3) и предварительная проверка (валидация) в одном эпизоде с экстремальным уровнем загрязнения (п. 4). Краткие результаты и перспективы изложены в заключении.

**2. Конфигурация модели.** Численное моделирование осуществлялось на базе мезомасштабной модели WRF, установленной в Лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ. Основные характеристики и возможности модели подробно изложены в наших предыдущих работах [1, 2]. Здесь мы остановились на особенностях конфигурации модели, необходимой для моделирования локальных циркуляций в периоды СЭЗ.

**2.1. Метеопараметры для валидации модели.** Валидация результатов моделирования требует сравнения модельных и измеренных метеорологических величин (метеопараметров) в различных точках исследуемой территории. На территории г. Челябинска и его окрестностей регулярные метеорологические измерения производятся всего на двух метеостанциях: в п. Шершни каждые 6 часов и в аэропорту на метеостанции (АМСГ) Баландино, где приземные параметры измеряют каждый час в виде регулярной сводки погоды в коде METAR. На стационарных постах экологического мониторинга Челябинска некоторые приземные метеопараметры измеряются во время отбора проб воздуха в 7, 13 и 19 ч. местного времени, кроме выходных дней. Таким образом, для валидации результатов моделирования в нашей работе использованы данные измерений приземной температуры (2 м) и скорости ветра на уровне флюгера (10 м) на метеостанции Шершни, АМСГ Баландино, на постах мониторинга № 22 (Металлургический р-н) и № 28 (Центральный р-н, ЧЦГМС).

**2.2. Пространственное разрешение.** Другим аспектом, который влияет на качество результатов моделирования, является пространственное разрешение географических данных и учет особенностей строения подстилающей поверхности города. В использованной нами версии 3.2 модели

WRF для расчета потоков тепла, влаги и количества движения использована модель подстилающей поверхности Noah [4], в которой приземный слой городской атмосферы представлен в виде однослойной (UCM) и многослойной (BER) модели. Для моделирования внутригородских воздушных циркуляций требуется использовать высокое пространственное разрешение геоданных. В настоящее время свободно доступна база геоданных (рельеф, тип землепользования) с разрешением 30 угловых секунд, что на широте Челябинска составляет 500 м с запада на восток и 900 м с юга на север. В качестве начальных и граничных условий для моделирования атмосферных параметров использовались метеоданные анализа NCEP с пространственным разрешением 0,5 град по широте и долготе.

При таком исходном пространственном разрешении данных о рельефе и типах землепользования перед нами ставится задача подобрать наиболее подходящие условия для моделирования и произвести валидацию этих параметров для дальнейшего использования при расчетах приземных условий в различные дни с НМУ.

**2.3. Область моделирования** ограничена по широте  $54^{\circ} \div 56^{\circ}$  с.ш. и по долготе  $60 \div 63^{\circ}$  в.д., и включает г. Челябинск и окружающие его территории (рис.). Разрешение модели по горизонтали варьирует в зависимости от варианта расчета. Пространственные характеристики всех вариантов расчета представлены в таблице 1. По вертикали было задано 34  $\sigma$ -уровня, 7 из которых находятся в нижнем приземном слое 1 км.

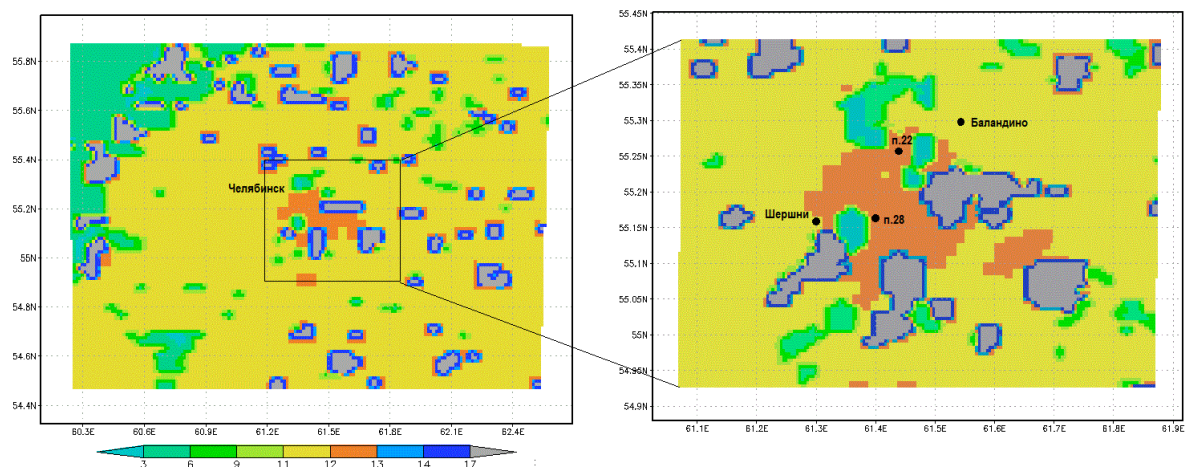
Таблица 1

Пространственные характеристики области моделирования

№ варианта	Кол-во доменов	Размер, км запад-восток × север-юг		шаг сетки, км	
		1-й домен	2-й домен	1-й домен	2-й домен
1	1	90 × 80		2	
2	2	90 × 81	37 × 40	3	1
3	2	90 × 81	49 × 52	3	1
4 (UCM)	2	153 × 159	52 × 55	3	1
5 (BER)	2	153 × 159	52 × 55	3	1

**2.4. Физика модели.** Для моделирования атмосферных процессов в холодный период года были выбраны следующие схемы параметризации: для микрофизических процессов – WRF single-moment 3-class scheme, включает взаимные превращения жидкой воды, снега и льда в атмосфере и эффективно работает в мезомасштабных сетках; для потоков длинноволновой радиации – RRTM; для потоков коротковолновой радиации – схема Dudhia; параметризация пограничного слоя – параметризация Mellor-

Ямады-Янича, параметризация турбулентности в пограничном слое в свободной атмосфере; приземный слой – параметризация Эта-модели, основывается на уравнениях теории подобия Монина-Обухова, масштабе термической неоднородности Зелинткевича и стандартными функциями подобия; для параметризации процессов в почве и на поверхности – схема Noah. Для задания параметров подстилающей поверхности в городской застройке в вариантах расчета 1-4 (табл. 1) использована однослойная модель городского приземного подслоя UCM (Urban Canopy Model); для варианта расчета 5 ВЕР (Building Environment Parameterization) – многослойная модель, учитывающая вклад в потоки энергии зданий различной высоты.



Фрагмент области моделирования, содержащий территорию города, с указанием типов землепользования. Обозначения соответствуют принятым в модели WRF категориям: 13 – городская застройка; 12 – пашня, 6 7 – залежи, покрытые кустарником и т.п., 10–11 местности, занятые луговой растительностью, заболоченные земли; 1–2, 3–4, 5 – хвойный, лиственный и смешанный лес, 17 – водные объекты

**3. Выборка случаев экстремального загрязнения.** Подход к созданию адекватной выборки СЭЗ опирается на работу [3] и предусматривает единообразную статистическую обработку наблюдений концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) измеренных на нескольких пунктах наблюдения загрязнения (ПНЗ) городской атмосферы. Выборка случаев для объектно-ориентированной валидации модели городской атмосферы Челябинска формировалась в три этапа: 1) определялись критические события, когда разовая концентрация загрязняющего вещества (ЗВ) на ПНЗ принадлежала старшим квантилям годового распределения ЗВ; 2) определялась интенсивность загрязнения городской атмосферы (ИЗ) – число критических событий по всему городу за одни сутки; 3) все случаи загрязнения атмо-

сферы за год ранжировались по возрастанию ИЗ в баллах и выделялось по 10 суток с наибольшей ИЗ теплого сезона (с мая по октябрь) и 10 суток с наибольшей ИЗ холодного сезона (ноябрь-апрель). Все эти 20 суток определялись как СЭЗ Челябинска за один год. К настоящему времени создана выборка данных из 100 СЭЗ за пятилетний период, который можно рассматривать адекватным для оценки качества объектно-ориентированного моделирования.

В качестве иллюстрации выборки СЭЗ в таблице 2, представлена ИЗ – интенсивность загрязнения (столбец 3), число случаев превышения предельно-допустимых максимально-разовых концентраций (ПДК<sub>м.р.</sub>, столбец 4) в СЭЗ, а в столбцах 5-14 число критических событий, обусловленных различными ЗВ (очевидно, что сумма критических событий равна ИЗ). Подробное обсуждение выборки и результатов анализа эколого-химической структуры СЭЗ выходит за рамки данной работы, здесь лишь укажем, что используемый нами подход позволяет разработать более устойчивую характеристику экстремального загрязнения, нежели традиционный подход, основанный на ПДК<sub>м.р.</sub>

Таблица 2

Интенсивность и эколого-химическая структура СЭЗ  
холодного периода 2009 года

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
№	Дата СЭЗ	ИЗ баллы	ЗВ $\geq$ ПДК <sub>м.р.</sub>	Формальдегид	Угарный газ	Взвешенные вещества	Сернистый газ	Двуокись азота	Аммиак	Моноксид азота	Сероводород	Фенол	Фторид водорода
11	28.01	16	1		4	1	1	7		1		1	1
12	11.02	23	1	1	1	2	5	8		4		1	1
13	12.02	14	1				8	3		2			
14	18.02	14	3		3	1		7		3			
15	21.02	16	4			4	5	3		1	1		2
16	25.02	12	2		5	2	3			1			1
17	16.11	14	3		4	4	1	4		1			
18	17.11	23	7		4	4	4	9		1	1		
19	18.11	17	1			4	2	7		3		1	
20	20.11	15	7	1	1	4		5		4			
<b>Холодный сезон</b>		<b>163</b>	<b>30</b>	<b>2</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>29</b>	<b>53</b>	<b>0</b>	<b>21</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>

**4. Результаты эксперимента.** В качестве иллюстрации тестирования выбранной конфигурации модели взят эпизод экстремального загрязнения за 28 января 2009 г. (см. табл. 2). Как видим, этот день характеризовался средней интенсивностью СЭЗ за данный год и небольшими отличиями в

эколого-химической структуре, демонстрирующей предположительно накопление в приземном слое выбросов металлургических предприятий (фторид водорода, фенол). Синоптическая ситуация в этот день соответствовала малоградиентному полю атмосферного давления. Продолжительное время наблюдалась приземная температурная инверсия (39 часов), максимум которой составил 11 градусов в срок наблюдения 8 утра местного времени; на метеостанции Шершни отмечался туман, в течение дня преобладал штиль или переменный ветер, на высоте – ветер юго-западный, 3–5 м/с. Данные о концентрациях загрязняющих веществ и измеренных метеопараметрах предоставлены сотрудником Челябинского ЦГМС, аспиранткой ЮУрГУ Напольских Е.А. [3]. Расчеты производились для периода с 18:00 ВСВ 27/01/2009 г. по 00:00 ВСВ 29/01/2009 г., граничные условия менялись каждые 6 ч.

Для оценки близости результатов вычисления метеорологических величин с помощью модели WRF и измерений на метеостанциях и постах были рассчитаны разности между прогнозируемыми приземной температурой и скоростью ветра и результатами наблюдений (табл. 3). Результаты моделирования имеют временной шаг 1 час. Измерения на постах мониторинга производится 3 раза в сутки в 7, 13 и 19 ч местного времени. В эти же часы взяты данные моделирования и составлены абсолютные разности между измеренными и рассчитанными метеопараметрами. Для метеостанции Шершни имеются данные измерений уже 4 раза в сутки, а на метеостанции Баландино данные измерений поступают раз в час.

В целом модель хорошо описывает основные тенденции изменения температуры и скорости ветра в течение указанного периода наблюдений. Однако воспроизводятся не все особенности их временного хода. Средняя абсолютная разность температуры и скорости ветра между модельными расчетами и данными наблюдений для рассмотренного случая представлена в таблице 3.

Таблица 3

Среднее абсолютное отклонение |измерение – WRF| моделируемых и наблюдаемых температур  $\Delta t$  и ветра  $\Delta u_{10}$  в различных точках Челябинска

Вариант расчета	Шершни		п. 28		п. 22		Баландино*	
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta u_{10}, \text{ м/с}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta u_{10}, \text{ м/с}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta u_{10}, \text{ м/с}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta u_{10}, \text{ м/с}$
1	1,9	1,7	2,4	2,1	5,9	1,5	1,9 (0,94)	1,2 (0,81)
2	1	0,8	5	0,4	7,6	0,1	0,8 (0,89)	0,3 (0,81)
3	0,9	0,9	4,9	0,4	7,3	0,7	1,0 (0,93)	0,6 (0,73)
4	1,1	1,7	5,4	1,1	7,3	0,9	1,4 (0,90)	1,6 (0,66)
5	2,1	1,7	4,0	1,6	5,4	1,7	2,1 (0,90)	1,6 (0,65)

\* Для станции Баландино в скобках приведены коэффициенты корреляции между модельными и наблюдаемыми температурой и ветром.

1. Как видно, вычисленные значения температуры более существенно отличаются от измеренных для точек внутри города (п. 22 и п. 28), по сравнению с пригородом (Шершни, Баландино).

2. Варианты расчета 2 и 3 в целом показывают вполне сходный результат и могут быть объединены в один, то есть увеличение размеров вложенного домена при общем внешнем домене существенно не влияет на результат моделирования.

3. При выборе параметризации ВЕР многослойного приземного городского подслоя (вариант 6) модель точнее воспроизводит реально измеренную температуру внутри города, чем в случае параметризации UCM (вариант 5).

4. В то же время UCM позволяет точнее рассчитать температуру в пригороде (Шершни, Баландино) в сравнении с ВЕР.

5. Скорости ветра на уровне флюгера (10–12 м над поверхностью земли) более реалистично воспроизводятся моделью в случаях 2 и 3 как внутри города, так и в пригороде.

6. Коэффициенты корреляции между измерениями температуры и ветра на метеостанции Баландино демонстрируют значимую связь между измерениями и расчетами. Для температуры воздуха корреляция для всех случаев выше, чем для скорости ветра. Следует отметить, что в исследуемый период скорость приземного ветра очень слабая, почти штиль, и только к концу периода в связи с изменением синоптической ситуации скорость ветра стала возрастать.

**5. Заключение.** Таким образом, если судить по отдельным достаточно разнородным по свойствам подстилающей поверхности точкам, использование варианта расчета с вложенным доменом размерами 37×40 км и внешним порядка 270×243 км более реалистично описывает распределение приземной температуры и скорости ветра при параметризации городского приземного слоя UCM. При имеющейся в нашем распоряжении базе гео-данных пространственного разрешения 30' такая конфигурация модели наиболее близко описывает реальную ситуацию. В дальнейшем нам предстоит подобрать подходящую конфигурацию для моделирования атмосферных условий в дни с экстремальным загрязнением в теплый период года, и далее выполнить серию расчетов для выявления характерных приземных циркуляций в атмосфере Челябинска в периоды с экстремальным загрязнением.

#### Библиографический список

1. Ленская, О.Ю. Численное моделирование характеристик пограничного слоя атмосферы крупного промышленного города (на примере г. Челябинска) / О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев, А.И. Приказчиков, Д.Н. Соболев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 65–82.

2. Ленская, О.Ю. Перспективы использования модели WRF для исследования острова тепла г. Челябинска / О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев // Наука ЮУрГУ: сборник трудов 64-й научной конференции профессорско-преподавательского состава. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012.

3. Абдуллаев, С.М. К вопросу объективного определения случаев экстремального загрязнения городской атмосферы (на примере Челябинска) / С.М. Абдуллаев, Е.А. Напольских, О.Ю. Ленская // Наука ЮУрГУ: сборник трудов 67-й научной конференции профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ, 2015. – URL: <http://dspace.susu.ac.ru/xmlui/handle/0001.74/5355/>.

4. The Community Noah Land-Surface Model (LSM): User's Guide. – URL: [ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/gcp/ldas/noahlsm/ver\\_2.7.1/](ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/gcp/ldas/noahlsm/ver_2.7.1/).

[К содержанию](#)