

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.589.6

Моделирование опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири с помощью модели атмосферы WRF

С.Ю. Золотов[✉], А.С. Логинов*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 23.05.2024;
после доработки 29.08.2024;
принята к печати 02.09.2024

В настоящее время на территории Западной Сибири происходит увеличение частоты и интенсивности опасных погодных явлений. Модель атмосферы Weather Research and Forecasting (WRF) позволяет исследовать такие явления, в частности для предупреждения о возможности их возникновения. В данной статье определен набор схем параметризаций WRF, предоставляющих полноценную возможность изучать причины возникновения опасных метеорологических явлений и их развитие. Подробно рассмотрены две погодные ситуации на территории Западной Сибири 29–30.04.2019 г. и 25–26.12.2020 г., сопровождавшиеся такими опасными явлениями, как очень сильный ветер, сильный ливень, продолжительный сильный дождь, аномально холодная погода. Выбранный набор схем обеспечивает корректную работу модели WRF в условиях, соответствующих опасным метеорологическим явлениям.

Ключевые слова: опасные метеорологические явления, региональное моделирование, параметризация атмосферных процессов, Западная Сибирь, данные наблюдений метеостанций; severe weather event, regional simulation, parameterization of atmospheric processes, Western Siberia, weather station observations.

Введение

На сегодняшний день на территории Западной Сибири климатические изменения приводят к увеличению интенсивности и частоты опасных природных явлений [1], которые имеют негативные последствия как для человека, так и для экономики [2]. Редкая сеть пунктов измерений на такой обширной территории не позволяет полноценно изучать и определять факторы, приводящие к опасным явлениям. В связи с этим исследователи все чаще используют численные модели атмосферы. В настоящей работе рассматривается модель Weather Research and Forecasting (WRF), предназначенная как для атмосферных исследований, так и для оперативного прогнозирования. Она позволяет детально воспроизводить события, связанные с возникновением и дальнейшим развитием опасных метеорологических явлений в изучаемой области [3].

На территории Российской Федерации наиболее активные исследования опасных природных явлений с помощью модели WRF ведутся в восточной (включая Уральский регион) [4], центральной частях европейской территории России [5–7] и За-

падной Сибири [8]. В зарубежной литературе также имеются публикации по опасным явлениям конвективного характера, например на территории Бразилии (субтропический шторм Гуара 09.12.2017 г.) [9] и события 12.03.2003 г., 03.04 и 24.05.2004 г. в Индии [10]. В этих работах описывается достаточно много преимуществ использования модели WRF для детального рассмотрения случаев экстремального характера. Основные недостатки этой модели — завышение значений осадков и расхождения площади их выпадения с данными наблюдений. Модель WRF имеет достаточно много схем параметризаций физических процессов с разной степенью детальности, что дает возможность исследователю выбрать оптимальную для решения своей задачи конфигурацию модели.

Цели настоящей работы — определение наборов схем параметризаций модели атмосферы WRF, подходящих для исследования опасных метеорологических явлений, а также выявление с помощью этой модели факторов, приводящих к таким явлениям.

Материалы и методы

В качестве исследуемой была выбрана область Западной Сибири размерами 2100 × 1800 км с координатами 47–63° с.ш. и 65–105° в.д., включающая в себя большую часть Западно-Сибирской равнины.

* Сергей Юрьевич Золотов (zolotov@imces.ru); Андрей Сергеевич Логинов (loginovsim@gmail.com).

В настоящей работе рассматриваются два события в 2019 и 2020 гг., которые сопровождались опасными метеорологическими явлениями.

Событие 1: возникновение 29–30.04.2019 г. ранней активной грозовой деятельности со шквалистым усилением ветра до 25 м/с. Начиная с 27.04.2019 г. — смещение основного полярного фронта далеко на север и кратковременное вторжение тропической воздушной массы с последующим прохождением холодного фронта и наступлением арктической воздушной массы. В рамках этого события возникли три опасных метеорологических явления: очень сильный ветер, сильный ливень и продолжительный сильный дождь, которые являются характерными ситуациями, моделируемыми большинством исследователей.

Событие 2 связано с возникновением большой области аномального холода на территории Западной Сибири 25–26.12.2020 г. Начиная с 22 декабря по мере смещения арктического фронта к юго-востоку формируется область очень высокого давления (1045 гПа и выше), которая движется на юг Западной Сибири; 25–26.12.2020 г. отмечалось прояснение небосвода над большей частью Западной Сибири, а также резкое падение температуры воздуха (до -40°C и ниже). В эти даты у поверхности земли наблюдался штиль, на юге Западной Сибири — ледяные туманы. Данное событие привело к аномально холодной погоде — опасному явлению, возникновение которого практически не рассматривается исследователями.

Для моделирования этих событий в изучаемом регионе применялась версия 4.3.3 модели Advanced Research WRF. Была задана картографическая проекция Ламберта с шагом интегрирования расчетного домена по обоим пространственным координатам в 10 км. Все расчеты проводились за периоды 25.04–05.05.2019 г. (событие 1) и 20–30.12.2020 г. (событие 2) с шагом вывода результатов в один час. Внутренний временной шаг модели — 30 с, что обеспечивает устойчивость вычислительной схемы во всех наборах параметризаций. Определено 45 вертикальных уровней при максимальном уровне высоты 50 гПа.

В качестве начальных и граничных условий взяты результаты глобального анализа Global Data Assimilation System (GDAS) на сетке $0,25 \times 0,25^{\circ}$ с шестичасовой дискретностью по времени. Физика подстилающей поверхности реализуется схемой Unified Noah land-surface model, которая является наиболее универсальной из всех параметризаций этого типа.

Для сравнения различных схем параметризаций используются данные наблюдений 211 метеорологических станций, расположенных в изучаемом регионе. Сравниваются средние абсолютные ошибки (CAO, mean absolute error) следующих метеорологических величин: T — температуры воздуха на высоте 2 м от поверхности земли, P — атмосферного давления на уровне станции, S — скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли и Q —

количества осадков за 12 ч. CAO вычисляется следующим образом:

$$e_x^{(y)} = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} |m_{xt} - y_{xt}|, \quad (1)$$

где $e_x^{(y)}$ — CAO метеовеличины y по модели на станции x ; N_t — количество сроков наблюдений; m_{xt} — значение метеовеличины по модели в ближайшей к станции x точке узла модельной сетки в срок наблюдений t ; y_{xt} — значение метеовеличины на станции x в срок наблюдений t ;

$$e^{(y)} = \frac{1}{N_x} \sum_{x=1}^{N_x} e_x^{(y)}, \quad (2)$$

где $e^{(y)}$ — CAO метеовеличины y по модели в исследуемой области; N_x — количество станций.

Оценка проводилась и по другим статистическим показателям (коэффициент корреляции, индекс согласованности рядов), однако их значения оказались очень близки между собой независимо от выбранного набора параметризационных схем.

Результаты и обсуждение

В данной работе рассматриваются параметризации моделью WRF четырех групп атмосферных физических процессов подсеточного масштаба: радиационных схем, схем планетарного пограничного и приземного слоев, схем микрофизических процессов и конвективной облачности.

Радиационные схемы

Радиационные схемы предусматривают учет изменений температуры атмосферы за счет дивергенции радиационного потока. В атмосфере излучение реагирует на предсказанное моделью распределение облаков и водяного пара, а также на заданные концентрации углекислого газа, оксида азота, метана, озона и других малых газовых примесей (включены не во все схемы). Некоторые схемы могут учитывать присутствие аэрозолей.

Было использовано шесть схем длинноволновой и коротковолновой радиации: 1) Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) для длинноволновой радиации + схема Dudhia для коротковолновой радиации; 2) Rapid Radiative Transfer Model for General circulation models (RRTMG); 3) Community Atmosphere Model (CAM); 4) Goddard; 5) Fu-Liou-Gu (FLG); 6) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL).

В табл. 1 приведены значения CAO всех четырех метеорологических величин по результатам запуска модели с соответствующими радиационными схемами. В первой строке ячейки указана CAO за периоды отсутствия опасного явления (25–28.04 и 02–05.05.2019 г. — событие 1; 20–23 и 27–30.12.2020 г. — событие 2), а во второй строке — в периоды опасного явления (29.04–01.05.2019 г. —

Таблица 1

Значения CAO (2) в схемах длинноволновой и коротковолновой радиации

Схема параметризации	$e^{(T)}$, °C		$e^{(P)}$, гПа		$e^{(S)}$, м/с		$e^{(Q)}$, мм/12 ч	
	Событие 1	Событие 2	Событие 1	Событие 2	Событие 1	Событие 2	Событие 1	Событие 2
RRTM + Dudhia	2,59 ± 1,92	3,48 ± 2,74	1,11 ± 0,92	0,89 ± 0,90	1,90 ± 1,49	2,54 ± 1,84	1,27 ± 1,72	0,96 ± 1,38
	2,70 ± 2,03	4,38 ± 2,89	1,04 ± 0,96	1,10 ± 0,90	2,11 ± 1,63	2,18 ± 1,71	0,95 ± 1,58	0,55 ± 1,20
RRTMG	2,36 ± 1,82	4,32 ± 2,96	0,99 ± 0,86	1,00 ± 1,08	1,91 ± 1,49	2,40 ± 1,78	1,47 ± 1,91	1,03 ± 1,43
	2,42 ± 1,90	5,30 ± 3,38	0,91 ± 0,90	1,29 ± 0,99	2,13 ± 1,61	2,06 ± 1,67	1,34 ± 2,31	0,75 ± 1,13
CAM	2,66 ± 1,94	3,73 ± 2,87	1,09 ± 0,93	0,94 ± 1,03	1,94 ± 1,51	2,38 ± 1,78	1,30 ± 1,73	0,93 ± 1,30
	2,72 ± 2,10	5,52 ± 3,59	1,06 ± 0,95	1,38 ± 0,89	2,18 ± 1,68	2,05 ± 1,67	1,03 ± 2,14	0,53 ± 0,93
Goddard	2,25 ± 1,77	3,53 ± 2,90	0,97 ± 0,89	0,93 ± 1,03	1,98 ± 1,53	2,49 ± 1,82	1,37 ± 1,83	0,93 ± 1,33
	2,30 ± 1,86	4,93 ± 3,20	0,91 ± 0,93	1,16 ± 0,92	2,21 ± 1,66	2,15 ± 1,70	1,33 ± 2,31	0,65 ± 1,03
FLG	2,44 ± 1,85	3,81 ± 2,85	1,05 ± 0,89	0,96 ± 1,04	1,98 ± 1,54	2,48 ± 1,81	1,50 ± 1,94	1,08 ± 1,47
	2,54 ± 1,96	4,88 ± 3,18	0,98 ± 0,92	1,22 ± 0,93	2,14 ± 1,63	2,13 ± 1,70	1,30 ± 2,26	0,80 ± 1,17
GFDL	2,13 ± 1,74	3,71 ± 3,01	0,94 ± 0,87	0,94 ± 1,04	2,03 ± 1,55	2,53 ± 1,85	1,37 ± 1,80	0,93 ± 1,30
	2,20 ± 1,95	5,15 ± 3,58	0,93 ± 0,90	1,23 ± 0,86	2,30 ± 1,75	2,16 ± 1,75	1,12 ± 2,19	0,54 ± 0,93

событие 1; 24–26.12.2020 г. — событие 2). Используемые в расчетах табл. 1 параметризационные схемы конвективной облачности, микрофизических процессов, пограничного и приземного слоев будут рассмотрены далее.

Набор схем RRTM + Dudhia дает достаточно приемлемые результаты: минимальная CAO для важных для события 1 метеовеличин (S и Q) и для события 2 (T и P). Для события 1 CAO максимальная для T и P , а для события 2 — для S . Схема RRTMG дала существенное уменьшение CAO для T и P (событие 1) и S (событие 2) и значительное увеличение CAO для T и P (событие 2) и Q (событие 1). Схема CAM аналогично предыдущим двум схемам имеет минимальную CAO для S и Q и максимальную для T и P . Согласно табл. 1, схема Goddard является оптимальной при моделировании опасных явлений, так как не имеет максимальной CAO и показывает минимальную ошибку для T и P . В схеме FLG CAO минимальная для S (событие 2) и максимальная для Q в обоих событиях. Схемы длинноволнового и коротковолнового излучений GFDL дают минимальную CAO для T и P (событие 1) и Q (событие 2) и максимальную для S для обоих событий.

Схемы пограничного и приземного слоев

Схемы параметризации планетарного пограничного слоя (ППС) определяют вертикальные подсеточные потоки за счет вихревых переносов во всем атмосферном столбе с учетом тенденций температуры, влажности и горизонтального импульса. Большинство схем ППС учитывает сухое перемешивание, но может учитывать и эффекты насыщения. Схемы параметризации приземного слоя вычисляют скорости трения и коэффициенты обмена, которые позволяют рассчитывать поверхностные потоки тепла и влаги.

В модели WRF доступно достаточно много схем ППС, но часть из них взаимодействует только с определенными схемами приземного слоя. Для

схем ППС в настоящей работе однозначно выбиралась, при наличии, одноименная схема приземного слоя, а в случае отсутствия таковой — схема, рекомендованная в описании модели, либо схема, имеющая устойчивое сочетание на основе ранее опубликованных работ.

Рассмотрено 11 взаимосвязанных между собой схем ППС и приземного слоя: 1) Mellor–Yamada–Janjic + Monin–Obukhov (MYJ + MO); 2) Yonsei University + Revised MM5 Monin–Obukhov (YSU + MM5MO); 3) Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE); 4) Mellor–Yamada Nakanishi and Niino Level 3 (MYNN3); 5) Asymmetric Convective Model (ACM2) + MM5MO; 6) Bougeault and Lacarrere (BouLac) + MO; 7) Bretherton–Park (BP) + MO; 8) Total Energy Mass Flux (TEMF); 9) Shin–Hong + MM5MO; 10) Grenier–Bretherton–McCa (GBM) + MM5MO; 11) E-ε (E-epsilon) + MO.

На рис. 1 показаны значения CAO при запуске модели с соответствующими наборами схем пограничного и приземного слоев с включением радиационной схемы Goddard как наиболее оптимальной по данным табл. 1. Набор схем MYJ + MO был установлен по умолчанию при сравнении радиационных схем в табл. 1. Согласно рис. 1 этот набор имеет минимальную CAO для S и близкую к максимальной для P (событие 2). Несмотря на усовершенствования в наборе схем YSU + MM5MO, они не имеют никаких преимуществ в сравнении с другими. Схема QNSE, наоборот, является вполне подходящей при моделировании опасных явлений, так как дает минимальные CAO для S и Q , однако стоит обратить внимание на максимальную CAO для T для события 2.

MYNN3 — схема с минимальной CAO для S и с максимальными ошибками для T и P . ACM2 дает минимальную CAO для P и Q , но не для S . BouLac дает ощутимые преимущества по метеовеличинам T и P , но для S ошибка большая. Схема BP определяет минимальное CAO только для T (событие 1). Схемы TEMF не уменьшает большие CAO.

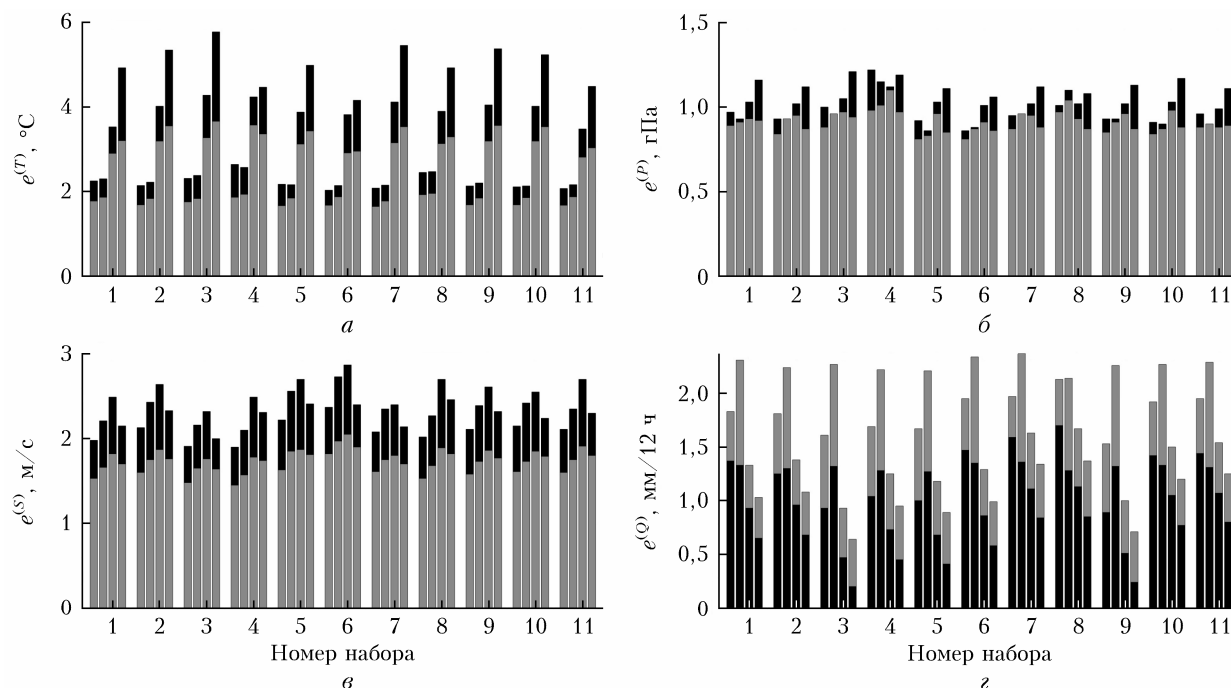


Рис. 1. Значения CAO для 11 наборов схем пограничного и приземного слоев: T (а), P (б), S (в), Q (з). В первом столбце каждого блока приведена CAO за 25–28.04. и 02–05.05.2019 г.; во втором – 29.04–01.05.2019 г.; в третьем – 20–23 и 27–30.12.2020 г.; в четвертом – 24–26.12.2020 г. Здесь и далее черной заливкой выделена CAO, а серой – ее средне-квадратичное отклонение

В схеме Shin–Hong CAO для Q минимальна. Схемы GBM и E-ε показывают максимальные CAO для S и Q .

Схемы микрофизических облачных процессов

Параметризации микрофизики описывают процессы, связанные с водяным паром, облаком и осадками. Одно из основных различий между схемами микрофизических процессов связано с количеством гидрометеоров, рассматриваемых как прогностическая переменная, а именно: водяной пар, облачные капли, дождевая вода, облачный лед, снег и крупа. В модель WRF включены как простые схемы, так и более сложные (используется большее количество гидрометеоров), однако применение сложных схем не во всех случаях приводит к улучшению качества расчетов.

Всего было рассмотрено 17 схем: 1) Kessler; 2) Thompson; 3) Purdue Lin; 4) Eta Grid-scale Cloud and Precipitation (Eta Ferrier); 5–8) WRF Single-Moment (WSM) 6-class, 7-class; WRF double moment (WDM) 6-class, 7-class; 9) Goddard 4-ice; 10) Milbrandt–Yau Double-Moment 7-class (MYDM7); 11) Morrison double-moment (Morrison); 12) CAM Morrison–Gettelman (CAMMG) 2-moment 5-class; 13) Stony Brook University (SBU) Lin–Colle, 5-class; 14) NOAA’s National Severe Storms Laboratory (NSSL) 2-moment 4-ice; 15) Predicted Particle Property (P3) 2-ice; 16) Jensen Ice-Spheroids Habit Model with Aspect-ratio EvoLution (ISHMAEL); 17) National Taiwan University (NTU) multi-moment.

На рис. 2 показаны значения CAO при запуске модели с соответствующими схемами микрофизики с включением радиационной схемы Goddard и набором схем пограничного и приземного слоев QNSE. Как было указано ранее, схема QNSE имеет максимальную CAO для T (событие 2), однако именно аномально низкая температура воздуха является ключевым метеопараметром при выборе схем микрофизики. В этом случае, используя преимущества QNSE для S и Q при моделировании опасных явлений, анализ CAO из рис. 2 позволяет выбрать «лучшие» схемы микрофизики, которые соответствуют условиям события 2. В остальных исследованиях опасных явлений, связанных с экстремальной температурой воздуха, лучше использовать схему BouLac + MO.

Схема Kessler дает минимальную CAO для Q только для события 1. Наиболее часто используемая в моделировании схема микрофизики Thompson была установлена по умолчанию при сравнении ранее рассмотренных схем из табл. 1 и рис. 1. Согласно рис. 2 схема Thompson показывает минимальную ошибку для Q только в случаях фактического отсутствия осадков как таковых. Схему Purdue Lin ничем не выделяется среди остальных. Схема Eta Ferrier явно нуждается в улучшении для условий, характерных для события 2.

Как видно из рис. 2, схема WSM6 отлично работает для T и P , однако для S показывает максимальную CAO для события 2. Улучшение в WDM6 позволило минимизировать CAO для S при увеличении этой ошибки для T (событие 1). Отличие

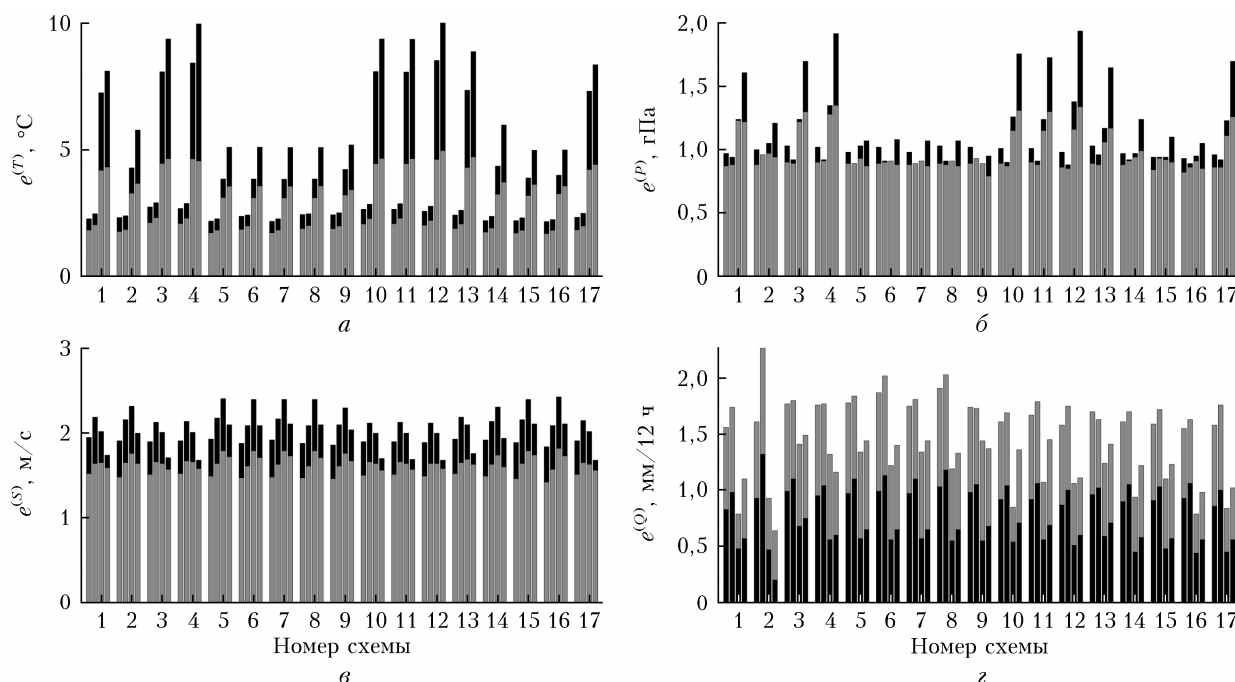


Рис. 2. Значения CAO для 17 схем микрофизики: T (а), P (б), S (в), Q (з)

схем WSM7 и WDM7 от WSM6 и WDM6 заключается в выделении крупы в отдельную седьмую категорию града. У схемы Goddard 4-ice только один плюс — минимальная CAO для P (случай 2). Обе схемы MYDM7 и Morrison дают непозволительно большую CAO для T . Схема CAMMG выдает достаточно большую ошибку для T . SBU, NSSL и P3, не имеют особых преимуществ по сравнению с другими схемами. У схемы ISHMAEL, в отличие от всех предыдущих схем микрофизики, минимальные CAO практически у всех метеовеличин, за исключением S для события 2. Схема NTU дает минимальную CAO для Q , но большую ошибку для T и P (событие 2).

Схемы конвективной облачности

Схемы конвективной облачности отвечают за подсчетные эффекты глубокой и мелкой конвекции. Они предназначены для параметрического описания вертикальных потоков массы, энергии и момента импульса, описания выделения скрытого тепла и расчета конвективных осадков. Отметим, что некоторые схемы не включают в себя расчет мелкой конвекции. При использовании высокого пространственного разрешения (несколько километров по горизонтали) модель WRF может воспроизводить конвективные процессы и напрямую — без параметризаций.

Рассматриваются 12 схем конвекции: 1) Modified Kain–Fritsch (KF), которая была установлена по умолчанию при сравнении ранее рассмотренных схем из табл. 1 и рис. 1 и 2; 2) Kain–Fritsch Cumulus Potential (KFCP); 3) Multi-scale Kain–Fritsch (KFMS); 4) Betts–Miller–Janjic (BMJ); 5) Grell–Devenyi ensemble (GD); 6) Grell 3D (G3);

7) Grell–Freitas (GF); 8) Simplified Arakawa–Schubert (SAS); 9) New Simplified Arakawa–Schubert (NSAS); 10) KIAPS Simplified Arakawa–Schubert (KSAS); 11) Tiedtke; 12) New Tiedtke.

В табл. 2 представлены значения CAO при запуске модели с соответствующими схемами конвективной облачности с включением радиационной схемы Goddard, набором схем пограничного и приземного слоев QNSE и схемы микрофизики ISHMAEL. Важное наблюдение из табл. 2: абсолютно все схемы конвективной облачности корректно «отключаются» в зимних условиях события 2, показывая очень близкие CAO. Моделирование конвективных условий события 1 выявляет небольшие отклонения в CAO между схемами, давая некоторое преимущество схеме KF из-за минимальной ошибки для Q непосредственно во время опасного явления.

По результатам моделирования можно выявить факторы, приводящие к опасным метеорологическим явлениям. В частности, для события 1 29.04.2019 г. на 09:00 (UTC + 07) перепад T составлял 40,6 °C в диапазоне от 62 ($T = -24,0$ °C) до 55° с.ш. ($T = 16,6$ °C) вдоль 75° в.д. В области очень теплого воздуха, сформированной адвекцией тепла, выделяются очаги сильной неустойчивости, хорошо проявляющиеся в полях возмущения давления; 30.04 в районе г. Томска отмечалось наименьшее значение $P = 981$ гПа, которое за последующие двое суток резко возросло до 1011 гПа.

Во время события 2 на севере исследуемого региона (выше 60° с.ш.) $T < -50$ °C, причем 25.12.2020 г. с 15:00 до 18:00 (UTC + 07) граница области холода -40 °C опустилась сразу на 5° с.ш. (от 58 до 53° с.ш.). В описываемом событии произошло наложение двух процессов в их максимальной

Значения САО в схемах конвективной облачности

Схема параметризации	$e^{(T)}$, С		$e^{(P)}$, гПа		$e^{(S)}$, м/с		$e^{(Q)}$, мм/12 ч	
	Событие 1	Событие 2	Событие 1	Событие 2	Событие 1	Событие 2	Событие 1	Событие 2
KF	2,15 ± 1,67	3,99 ± 3,25	0,93 ± 0,82	0,95 ± 0,91	1,84 ± 1,42	2,43 ± 1,82	0,93 ± 1,55	0,44 ± 0,79
	2,23 ± 1,80	4,99 ± 3,56	0,89 ± 0,86	1,05 ± 0,85	2,09 ± 1,57	2,11 ± 1,73	1,06 ± 1,63	0,56 ± 0,98
KFCP	2,26 ± 1,72	4,00 ± 3,24	0,92 ± 0,82	0,95 ± 0,92	1,83 ± 1,44	2,45 ± 1,83	0,87 ± 1,51	0,44 ± 0,79
	2,34 ± 1,87	5,01 ± 3,55	0,93 ± 0,90	1,05 ± 0,86	2,06 ± 1,61	2,14 ± 1,75	1,21 ± 1,84	0,54 ± 0,97
KFMS	2,23 ± 1,71	4,01 ± 3,25	0,91 ± 0,80	0,95 ± 0,92	1,80 ± 1,41	2,46 ± 1,84	0,82 ± 1,43	0,44 ± 0,79
	2,33 ± 1,89	5,02 ± 3,58	0,93 ± 0,90	1,05 ± 0,86	2,03 ± 1,58	2,15 ± 1,76	1,11 ± 1,68	0,55 ± 0,97
BMJ	2,14 ± 1,68	4,03 ± 3,25	0,92 ± 0,83	0,95 ± 0,91	1,86 ± 1,44	2,46 ± 1,83	0,88 ± 1,48	0,44 ± 0,78
	2,23 ± 1,84	5,06 ± 3,59	0,91 ± 0,88	1,04 ± 0,85	2,13 ± 1,60	2,14 ± 1,74	1,20 ± 1,82	0,54 ± 1,05
GD	2,16 ± 1,68	4,03 ± 3,26	0,91 ± 0,81	0,95 ± 0,91	1,85 ± 1,44	2,46 ± 1,83	0,89 ± 1,55	0,44 ± 0,78
	2,25 ± 1,84	5,04 ± 3,58	0,91 ± 0,88	1,05 ± 0,86	2,11 ± 1,62	2,15 ± 1,75	1,20 ± 1,94	0,55 ± 0,99
G3	2,17 ± 1,69	4,01 ± 3,26	0,91 ± 0,81	0,95 ± 0,92	1,85 ± 1,44	2,46 ± 1,84	0,88 ± 1,56	0,44 ± 0,79
	2,24 ± 1,84	5,02 ± 3,59	0,89 ± 0,86	1,05 ± 0,86	2,11 ± 1,64	2,15 ± 1,76	1,21 ± 1,91	0,55 ± 0,98
GF	2,16 ± 1,68	4,03 ± 3,26	0,91 ± 0,81	0,95 ± 0,91	1,85 ± 1,44	2,45 ± 1,83	0,93 ± 1,57	0,44 ± 0,78
	2,23 ± 1,83	5,07 ± 3,58	0,89 ± 0,86	1,05 ± 0,86	2,09 ± 1,61	2,14 ± 1,75	1,29 ± 1,97	0,54 ± 0,98
SAS	2,17 ± 1,69	4,00 ± 3,25	0,92 ± 0,82	0,95 ± 0,92	1,84 ± 1,43	2,45 ± 1,83	0,92 ± 1,56	0,44 ± 0,78
	2,26 ± 1,85	4,99 ± 3,55	0,90 ± 0,88	1,05 ± 0,85	2,08 ± 1,59	2,14 ± 1,75	1,23 ± 1,82	0,55 ± 0,99
NSAS	2,16 ± 1,68	4,01 ± 3,25	0,92 ± 0,82	0,95 ± 0,92	1,84 ± 1,43	2,46 ± 1,84	0,92 ± 1,50	0,44 ± 0,77
	2,25 ± 1,82	5,03 ± 3,57	0,92 ± 0,88	1,05 ± 0,86	2,06 ± 1,59	2,15 ± 1,76	1,26 ± 1,76	0,55 ± 0,97
KSAS	2,15 ± 1,68	4,01 ± 3,25	0,91 ± 0,82	0,95 ± 0,91	1,85 ± 1,44	2,46 ± 1,83	0,86 ± 1,50	0,44 ± 0,79
	2,25 ± 1,85	5,01 ± 3,56	0,89 ± 0,86	1,05 ± 0,86	2,07 ± 1,61	2,15 ± 1,76	1,18 ± 1,82	0,54 ± 0,99
Tiedtke	2,12 ± 1,67	3,99 ± 3,24	0,93 ± 0,82	0,94 ± 0,91	1,83 ± 1,43	2,49 ± 1,84	0,88 ± 1,48	0,44 ± 0,80
	2,23 ± 1,81	4,93 ± 3,54	0,91 ± 0,85	1,02 ± 0,83	2,07 ± 1,58	2,17 ± 1,74	1,17 ± 1,75	0,55 ± 1,01
New Tiedtke	2,22 ± 1,73	4,01 ± 3,24	1,03 ± 0,88	0,94 ± 0,91	1,87 ± 1,45	2,50 ± 1,86	1,00 ± 1,49	0,45 ± 0,79
	2,38 ± 1,91	5,00 ± 3,56	1,02 ± 0,90	1,01 ± 0,83	2,12 ± 1,62	2,16 ± 1,74	1,31 ± 1,73	0,55 ± 1,03
Без параметризации	2,16 ± 1,68	4,01 ± 3,25	0,91 ± 0,81	0,95 ± 0,92	1,85 ± 1,44	2,46 ± 1,84	0,89 ± 1,56	0,44 ± 0,78
	2,25 ± 1,85	5,01 ± 3,57	0,91 ± 0,88	1,05 ± 0,86	2,10 ± 1,62	2,15 ± 1,75	1,19 ± 1,88	0,54 ± 0,97

фазе развития: адвекции холодного воздуха со стороны полуострова Таймыр (со средним значением v -компоненты ветра -13 м/с на высоте 800 м) и радиационного выхолаживания (со средним значением восходящего потока длинноволновой радиации от поверхности 267 Вт/м²).

Заключение

Были подробно изучены схемы параметризации модели WRF и выявлены наиболее подходящие для использования при изучении опасных метеорологических явлений.

Набор схем Goddard, ISHMAEL, KF является оптимальным для моделирования как обычных синоптических ситуаций, так и различных опасных явлений. Для моделирования опасных явлений, связанных с сильными осадками или ветром, лучше всего подходит параметризация ППС и приземного слоя QNSE, а для связанных с аномальной температурой — параметризация BouLac+MO.

Также в рамках моделирования были выявлены процессы, факторы и условия (пространственный перепад температуры, наличие очагов сильной неустойчивости в полях возмущения давления, адвекция холодного воздуха и процесс радиационного выхолаживания), приводящие к таким опасным явлениям, на примере двух событий, произошедших на территории Западной Сибири в 2019 и 2020 гг.

Итоги исследования объясняют, почему в других работах по изучению опасных явлений наблю-

даются значимые расхождения между результатами моделирования и данными наблюдений — в них часто используется фиксированный набор схем параметризации атмосферных физических процессов подсеточного масштаба, в которые входят такие, которые не способны корректно работать в условиях, соответствующих опасным метеорологическим явлениям.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН, номер бюджетного проекта FWRG-2021-0001 (регистрационный номер проекта 121031300154-1).

Список литературы

- Харюткина Е.В., Логинов С.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н., Мартынова Ю.В. Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 2. С. 136–142. DOI: 10.15372/AOO20220208; Khar'yutkina E.V., Loginov S.V., Moraru E.I., Pustovalov K.N., Martynova Yu.V. Dynamics of extreme climatic characteristics and trends of dangerous meteorological phenomena over the territory of Western Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 4. P. 394–401. DOI: 10.1134/S1024856022040078.
- Оганесян В.В., Стерин А.М., Воробьева Л.Н. Потенциальные ущербы от опасных и неблагоприятных метеорологических явлений на территории Российской Федерации: региональные особенности // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. Т. 379,

- № 1. С. 143–156. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-1-143-156.
3. *Weather research and forecasting model (WRF)*. URL: <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf> (дата обращения: 20.05.2024).
 4. Калинин Н.А., Быков А.В., Шихов А.Н. Объектно-ориентированная оценка краткосрочного прогноза конвективных опасных явлений погоды в Пермском крае по модели WRF // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 3. С. 232–240. DOI: 10.15372/AOO20220308; Kalinin N.A., Bykov A.V., Shikhov A.N. Object-oriented estimation of the short-term forecast of convective hazardous weather events in Perm Krai by the WRF model // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 4. P. 423–433.
 5. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // *Метеорол. гидрол.* 2015. № 1. С. 27–37.
 6. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Азигов И.О. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов и смерчей на Европейской территории России // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 1. С. 62–69. DOI: 10.15372/AOO20190109; Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V., Azhigov I.O. Conditions for the appearance and short-time prediction of strong squalls and tornadoes in the European Part of Russia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 3. P. 334–344.
 7. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Yu. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // *Atmos. Res.* 2022. V. 267, N 105928. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105928.
 8. Кижнер Л.И., Барашкова Н.К., Ахметшина А.С., Барт А.А., Старченко А.В. Прогноз осадков в районе аэропорта Богашево с использованием модели WRF // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 12. С. 1098–1105; Kizhner L.I., Barashkova N.K., Akhmetshina A.S., Bart A.A., Starchenko A.V. Forecast of precipitation in the area of Bogashevo airport using the WRF model // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 2. P. 187–194.
 9. Kitagawa Y.K.L., Nascimento E.G.S., Souza N.B.P., Zucattelli P.J., Kumar P., Albuquerque T.T.A., Moraes M.R., Moreira D.M. Evaluation of the WRF-ARW model during an extreme rainfall event: Subtropical storm Guara // *Atmosfera*. 2022. V. 35, N 4. P. 651–672. DOI: 10.20937/ATM.52977.
 10. Halder M., Hazra A., Mukhopadhyay P., Siingh D. Effect of the better representation of the cloud ice-nucleation in WRF microphysics schemes: A case study of a severe storm in India // *Atmos. Res.* 2015. V. 154. P. 155–174. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.10.022.

S.Yu. Zolotov, A.S. Loginov. Simulation of severe weather events in Western Siberia using the WRF atmospheric model.

The intensity and frequency of events associated with severe weather phenomena are currently increasing in Western Siberia. The Weather Research and Forecasting (WRF) atmospheric model makes it possible to study such phenomena, in particular, for warning about their occurrence. This article defines a set of WRF parameterization schemes that provide a full-fledged analysis of the causes of occurrence and monitor the further development of severe weather events. This set of schemes ensures correct operation of the WRF model under conditions corresponding to severe weather events. The paper details two weather events with such severe phenomena as very strong wind, very heavy rainfall, prolonged heavy rain, and abnormally cold wave, which occurred in Western Siberia on April 29–30, 2019, and December 25–26, 2020.