

Э.К. Исаев, О.Г. Анискина

ВЛИЯНИЕ СХЕМ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА КАЧЕСТВО ПРОГНОЗА АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЙОНЕ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ КЫРГЫЗСТАНА

E.K. Isaev, O.G. Aniskina

IMPACT OF CLOUD MICROPHYSIC PARAMETRIZATION SCHEMES ON THE QUALITY OF ATMOSPHERIC PROCESSES FORECAST IN AREAS WITH COMPLEX RELIEF OVER TERRITORY KYRGYZSTAN

Проанализировано влияние разных схем параметризации микрофизических процессов на качество моделирования с использованием гидродинамической мезомасштабной модели WRF на территории со сложным рельефом на примере Кыргызстана. Рассмотрено качество прогноза осадков в зависимости от рельефа местности и от шага сетки. Определен оптимальный набор параметризаций физических процессов.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование; прогноз осадков; микрофизические процессы; параметризация; микрофизика WRF; качество прогноза.

The article analyzes the influence of different cloud microphysic parameterization schemes in hydrodynamic WRF mesoscale model on the quality of forecast of meteorological parameters on the territory with difficult terrain on the example of Kyrgyzstan. The quality of forecast precipitation has been considered depending on the terrain. The optimal set of parameterizations of physical processes has been determined.

Key words: hydrodynamic modeling; precipitation forecast; cloud microphysic; parameterization; WRF; quality of the forecast.

Важным фактором формирования общей циркуляции и теплового режима атмосферы являются процессы, определяемые орографией. Наличие термически и орографически неоднородной подстилающей поверхности приводит к появлению ряда особенностей движения воздуха. Для исследования атмосферных процессов в районе со сложным рельефом была выбрана территория Кыргызстана, где 94 % территории занимают горы со средней высотой 2750 м над уровнем моря [4].

Наибольшую опасность воздействия на экономику и население Кыргызстана представляют стихийные гидрологические явления. Из гидрометеорологических стихийных явлений самыми опасными являются сели и паводки, возникающие в результате таяния снега и ливневых дождей. Кроме того, на территории Кыргызстана располагаются 2000 высокогорных прорывоопасных озер, из которых 200 водоемов имеют высокую вероятность прорыва. Высокогорные территории в холодный период времени подвержены воздействию снежных лавин. В обследованных 779 районах снегонакопления, обнаружено 30 тысяч очагов лавинообразования.

Ежегодно регистрируется от 800 до 1500 сходов снежных лавин различного объема. Большинство лавин невозможно обследовать из-за неосвоенности и труднодоступности обширных площадей горных территорий [5]. Прогноз гидрометеорологических стихийных явлений напрямую связан с прогнозом осадков. Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что своевременный прогноз осадков дает возможность предупреждения наиболее опасных стихийных явлений над территорией Кыргызстана. Применение гидродинамических моделей атмосферы даёт возможность хорошо прогнозировать осадки и другие метеорологические величины на территории со сложным рельефом.

Для описания эволюции атмосферных процессов на территории Кыргызстана использовалась гидродинамическая мезомасштабная модель WRF [1]. Одной из важнейших задач работы является определение оптимального набора методов параметризации физических процессов. Так как целью было уточнение прогноза осадков, то особое внимание уделено параметризации микрофизических процессов. Исследовано влияние разных схемы параметризации микрофизических процессов на качество прогноза количества осадков и улучшение качества прогноза погоды в целом.

В работе модель WRF используется с динамическим ядром ARW, которая базируется на уравнениях гидродинамики атмосферы (уравнения движения, неразрывности, переноса импульса с учетом эффектов сжимаемости и негидростатичности, переноса влаги и внутренней энергии), записанных в декартовой системе координат по горизонтали с использованием вертикальной координаты η , которая напоминает систему сигма-координат, но отличается от нее тем, что определяется не через полное давление, а через его гидростатическую составляющую [2]. Гидродинамическую мезомасштабную модель WRF используют для исследований и для оперативного прогноза в разных регионах земли от полярных областей [1] до южных [9].

В качестве начальных условий необходимо задать трехмерные поля компонент скорости, температуры, давления и влажности, а граничные условия поставить для температуры, влажности и компонент скорости на боковых и на вертикальных границах области моделирования, а также значения потоков тепла, влаги и импульса на нижней границе расчётной области из реанализа Национального Центра Атмосферных Исследований (NCAR) [10].

Значительная сложность рельефа — глубокая расчленённость, различная экспозиция горных склонов по отношению к солнцу и потокам воздуха создают исключительное разнообразие особенностей климата. Согласно схеме климатического районирования на территории Кыргызстана, выделяют четыре климатических области: Северный и Северо-Западный Кыргызстан, Северо-Восточный Кыргызстан, Юго-Западный Кыргызстан и Внутренний Тянь-Шань [6]. По каждой из этой области из Кыргыз-ГидроМета получена информация об осадках: дата выпадения и количество осадков. Численные эксперименты по оценке качества прогноза и определения оптимального набора параметризаций проводились с привязкой к этим датам [3].

Для верификации прогнозов использовались результаты наблюдения за осадками на станциях из этих четырех районов. Результаты прогноза по модели интерполировались в точку с координатами этих станций. Оценивалось влияние на качество прогноза (осадков и других метеорологических полей) схемы параметризации

микрофизических процессов. В численных экспериментах был использован стандартный набор параметризации физических процессов WRF, а также ранее определенная в работе [3] фиксированная параметризация конвекции, а варьировался метод параметризации микрофизических процессов (табл. 1), влияние которого на качество прогноза изучалось.

*Таблица 1***Схемы параметризации микрофизических процессов, используемые в работе**

Параметризации микрофизических процессов	Обозначение схемы
Параметризация Кесслера [8]	KS
Параметризация спектральной модели 3 [7]	WSM3
Параметризация спектральной модели 6 [7]	WSM6

Для оценки качества прогнозов были рассчитаны абсолютные ошибки и средние абсолютные ошибки прогнозов. По этим критерием выбиралась лучшая конфигурация модели.

Исследования по адаптации и выбора оптимальной схемы параметризации конвекции были ранее проведены в работе [3] и выбрана наилучшая схема параметризации конвекции, где использовалась сетка размером 131 узел с запад на восток и 69 узлов с юга на север с горизонтальным разрешением 10 км и 27 уровнями по вертикали.

С целью повышения качества прогноза были проведены численные эксперименты по гидродинамическому моделированию процессов по всей территории Кыргызстана с увеличением горизонтального разрешения (уменьшением шага) до 5 км и с увеличением количество узлов до 284 с запад на восток и до 140 узлов с юга на север и 27 уровнями по вертикали. Результаты численного эксперимента приведены на рис. 1 и в табл. 2.

По анализу результатов численных экспериментов, приведенных на рис. 1 и в табл. 2, можно сделать вывод о том, что наблюдается уменьшение абсолютной ошибки и средней абсолютной ошибки. Отсюда следует, что с увеличением горизонтального разрешения от 10 до 5 км и с увеличением узлов от 142 до 284 с запада на восток и от 70 до 140 узлов с юга на север наблюдается улучшение качества прогнозов.

После того как в работе [3] определили оптимальную параметризацию конвекции в каждой климатической области и в целом для территории Кыргызстана, были проведены численные эксперименты для определения наилучшей параметризации микрофизических процессов.

Из анализа численных экспериментов по климатической области Юго-Западный Кыргызстан видно, что по абсолютным ошибкам прогноза осадков на рис. 2 лучшей схемой является схема WSM6, где абсолютная ошибка колеблется от минимума 1 мм/сутки до максимума 1,39 мм/сутки. При использовании схемы Кесслера получается худший прогноз, где абсолютная ошибка меняется от минимума 2,9 мм/сутки до максимума 25,3 мм/сутки. Также по средней абсолютной ошибке в табл. 3 худший прогноз по схеме Кесслера — 12,88 мм/сутки. Из анализа (табл. 3) видно, что лучший результат даёт использование схемы WSM6 со средней абсолютной ошибкой 6,45 мм/сутки.

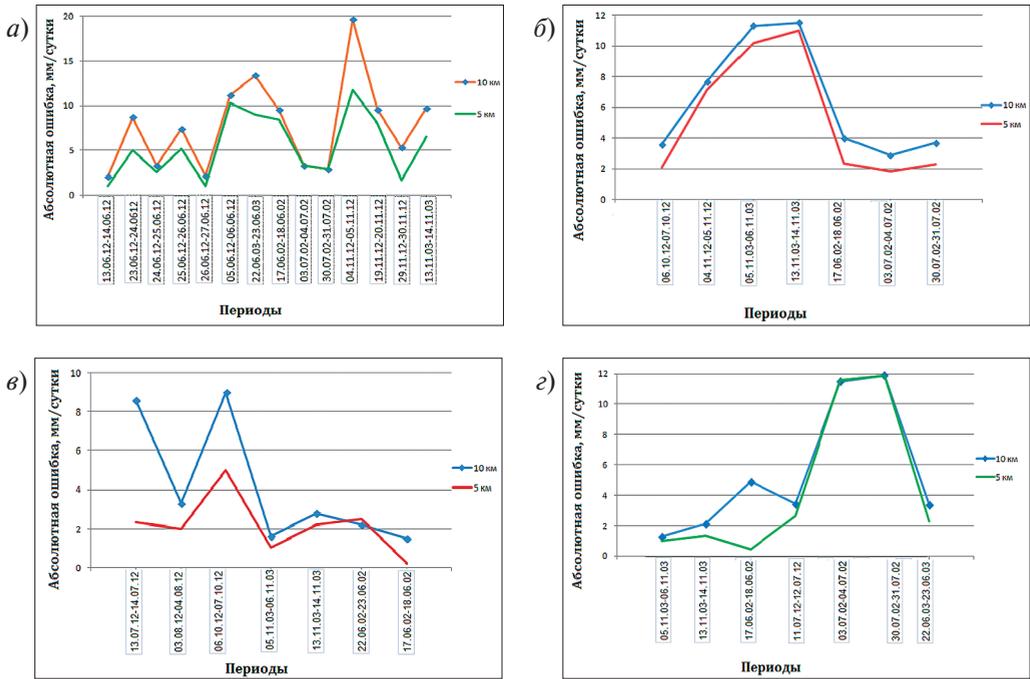


Рис. 1. Абсолютные ошибки прогнозов осадков по климатическим областям Кыргызстана: а – Юго-Западный Кыргызстан; б – Северный и Северо-Западный Кыргызстан; в – Северо-Восточный Кыргызстан; з – Внутренний Тянь-Шань

Таблица 2

Средние абсолютные ошибки прогнозов по климатическим областям Кыргызстана

Климатические области	Горизонтальное разрешение	Оцениваемая величина			
		Осадки, мм/сутки	Температура, К	Давление, гПа	Ветер, м/с
Юго-Западный	10 км	7,72	1,58	1,72	1,21
	5 км	6,45	1,48	1,69	1,12
Северный и Северо-Западный	10 км	6,39	1,07	1,19	1,56
	5 км	5,26	1,01	0,59	1,45
Северо-Восточный	10 км	3,93	0,62	2,33	2,03
	5 км	2,18	0,50	2,24	1,61
Внутренний Тянь-Шань	10 км	5,51	1,75	0,73	1,98
	5 км	4,46	1,59	0,56	1,91

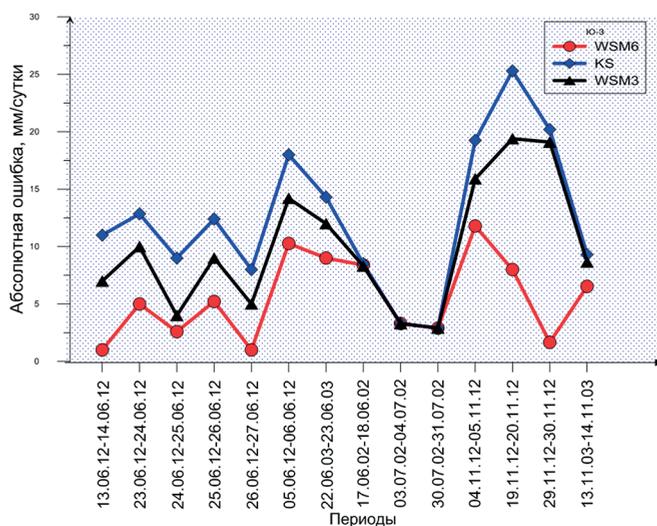


Рис. 2. Абсолютные ошибки прогнозов осадков по климатической области Юго-Западный Кыргызстан

Таблица 3

Средние абсолютные ошибки прогнозов по климатическим областям Кыргызстана

Климатические области	Схемы микро-физики	Оцениваемая величина			
		Осадки, мм/сутки	Температура, К	Давление, гПа	Ветер, м/с
Юго-Западный	KS	12,88	2,18	1,93	1,52
	WSM3	10,79	1,80	2,01	2,12
	WSM6	6,45	1,49	1,70	1,12
Северный и Северо-Западный	KS	9,36	0,62	1,90	1,82
	WSM3	8,11	0,74	1,61	2,07
	WSM6	5,27	0,59	0,59	1,45
Северо-Восточный	KS	7,81	0,51	2,41	1,48
	WSM3	6,37	0,69	2,51	1,49
	WSM6	2,18	0,50	2,24	1,61
Внутренний Тянь-Шань	KS	6,58	1,45	0,45	2,17
	WSM3	7,67	1,48	0,51	1,42
	WSM6	4,46	1,60	0,56	1,94

Средние абсолютные ошибки прогнозов температуры, давления, ветра (табл. 3) незначительно отличаются в зависимости от схемы параметризации микрофизических процессов. Скорее всего, большее влияние на прогноз этих метеорологических величин оказывает параметризация пограничного и приземного слоя. Работа по изучению этих процессов будет проведена в дальнейшем.

По результатам численных экспериментов в климатической области Северный и Северо-Западный Кыргызстан выявлено, что по абсолютным ошибкам прогноза осадков (рис. 3) лучшей схемой является схема WSM6, где абсолютная ошибка колеблется от минимума 1,8 мм/сутки до максимума 10,2 мм/сутки. Худшей схемой является схема Кесслера, где минимум 2,2 мм/сутки и максимум 17,72 мм/сутки со средними абсолютными ошибками 2,27 мм/сутки и 9,36 мм/сутки (табл. 3).

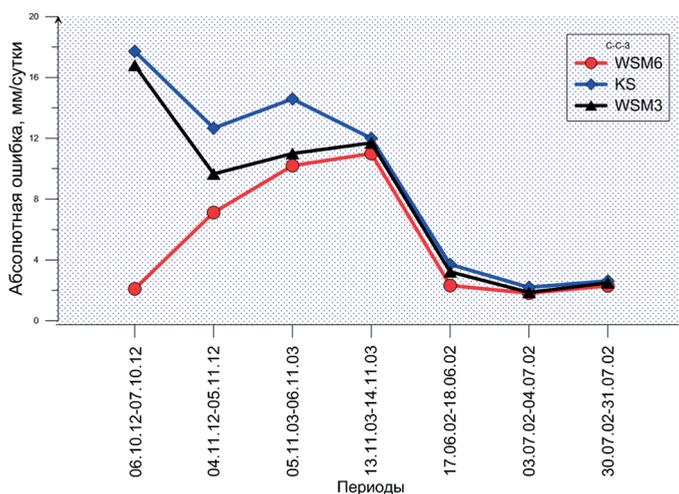


Рис. 3. Абсолютные ошибки прогнозов осадков по климатической области Северный и Северо-Западный Кыргызстан

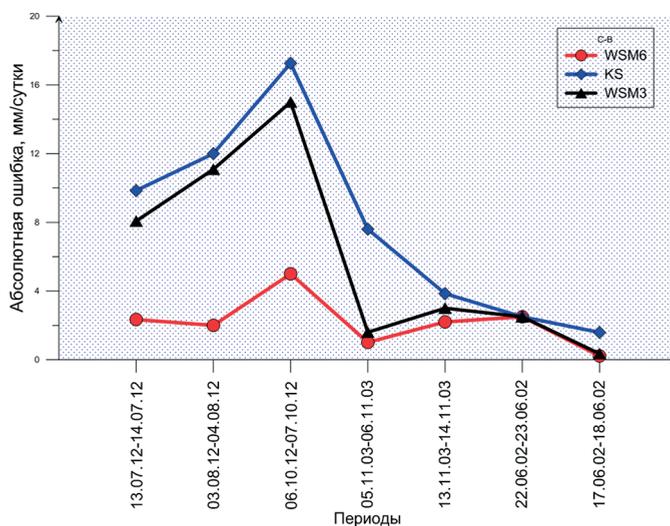


Рис. 4. Абсолютные ошибки прогнозов осадков по климатической области Северо-Восточный Кыргызстан

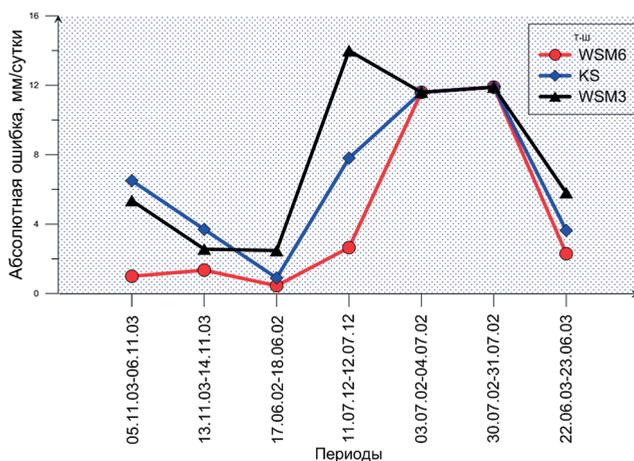


Рис. 5. Абсолютные ошибки прогнозов осадков по климатической области Внутренний Тянь-Шань

Из совместного анализа результатов численных экспериментов по климатической области Северо-Восточный Кыргызстан можно сделать вывод: прогноз со схемой WSM6 показывает хорошую оправдываемость прогноза осадков с абсолютными ошибками, где максимум 2,34 мм/сутки и минимум 0,22 мм/сутки. Худшей схемой является схема Кесслера, где абсолютная ошибка с минимумом 1,59 мм/сутки и максимумом 17,26 мм/сутки. Также по средней абсолютной ошибке (табл. 3) худший прогноз по схеме Кесслера — средняя абсолютная ошибка 7,81 мм/сутки лучший прогноз по схеме WSM6 — 2,18 мм/сутки.

Из анализа численных экспериментов по климатической области Внутренний Тянь-Шань видно, что и по абсолютным ошибкам прогноза осадков (рис. 5) и по средним абсолютным ошибкам (табл. 3) лучшей схемой является схема WSM6, где абсолютная ошибка колеблется от минимума 0,45 мм/сутки до максимума 11,9 мм/сутки, а худшая схема — схема Кесслера, где абсолютная ошибка меняется от минимума 0,9 мм/сутки до максимума 11,9 мм/сутки. Также по средней абсолютной ошибке (табл. 3) худший прогноз по схеме Кесслера — средняя абсолютная ошибка 6,58 мм/сутки лучший прогноз по схеме WSM6 — 4,46 мм/сутки.

В целом по всем климатическим областям самой лучшей схемой является схема WSM6. Так как в схеме WSM6 учитывается 6 типов гидрометеоров: q_v (водяной пар), q_{c_w} (жидкие частицы облачности), q_{c_i} (кристаллы льда), q_r (дождь), q_s (снег) и q_g (крупя). Очевидно, что в этом случае снимаются ограничения на разделение фаз нулевой изотермой, которая есть в схеме WSM3, предполагается существование смешанных фаз для облаков и осадков. В параметризации WSM3 при температуре $T \geq 0^\circ\text{C}$ облачность и осадки предполагаются существующими только в жидкой фазе, а при $T < 0^\circ\text{C}$ они могут быть исключительно в твердой фазе. При переходе через нулевую изотерму происходит мгновенное замерзание и таяние гидрометеоров. Таким образом, в каждой точке области может существовать только 3 типа гидрометеоров: q_v (охлажденный пар), q_{c_i} (кристаллы льда), q_s (кристаллы снега) при $T < 0^\circ\text{C}$ и q_v (водяной пар), q_{c_w} (жидкие

частицы облака), q_r (дождь) при $T \geq 0^\circ\text{C}$. Схема Кесслера показала худшие результаты. Так как схема Кесслера самая простая, облака и осадки учитываются только в жидкой фазе. Облачность характеризуется только водностью.

Территория Кыргызстана является горной местностью со сложным рельефом. Примерно 94 % территории занимают горы. При движении воздуха возникают вертикальные токи, где поднимается воздух, охлаждаясь, и происходят фазовые переходы с выделением тепла, что приводит к появлению гидрометеоров и выпадению осадков. По анализу численных экспериментов лучшей схемой является схема WSM6, где учитывается 6 типов гидрометеоров.

Обобщая всё вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

- для прогноза атмосферных процессов для всей территории Кыргызстана лучшей схемой параметризации микрофизических процессов является схема WSM6;
- увеличением горизонтального разрешения 5 км и с увеличением узлов 284 с запада на восток и 140 узлов с юга на север наблюдается улучшение качества прогнозов по всем климатическим областям.

В дальнейшем планируется продолжить исследования по гидродинамическому моделированию атмосферных процессов в Кыргызстане и повысить его качество переходом на более мелкие сетки и выбором других параметризаций физических процессов. Для повышения точности начальных данных планируется применение различных подходов ассимиляции начальных данных.

Литература

1. Бычков В.И., Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г. Анализ тепловых потоков на поверхности по расчетам модели WRF-ARW в полярных областях. // Ученые записки, 2011, № 20, с. 42–43.
2. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. // Сборник трудов 80 лет Гидрометцентру России. — М: ТРИАДА ЛТД, 2010, с. 94–134.
3. Исаев Э.К. Гидродинамическое моделирование атмосферных процессов в Кыргызстане. // Вестник КРСУ, 2014, т. 14, вып. 7, с. 49–53.
4. Информационно-образовательный портал. Кыргызстан, географические положения, 2003–2014. — Электронный ресурс: [<http://www.kyrgyzstan.orexca.com/rus>].
5. Улучшение гидрометеорологического обеспечения в Кыргызской Республике. — М.: Алекс., 2009, с. 4–5.
6. Справочник по климату. Вып. 32. Ч. IV. — Л.: Гидрометеиздат, 1969, с. 307–308.
7. Hong S.-Y., Dudhia J., Chen S.-H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. // Mon. Wea. Rev., 2004, vol. 132, no. 1, pp. 103–120.
8. Kessler E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. // Meteor. Monogr., Amer. Meteor. Soc., 1969, no. 32. — 84 p.
9. Kondowe A.L. Impact of Convective Parameterization Schemes on the Quality of Rainfall Forecast over Tanzania Using WRF-Model. // Natural Science, 2014, no. 6, pp. 691–699.
10. National Centers for Atmospheric Research's CSIL Research Data Archive. — Электронный ресурс: [<http://www.rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#access>].
11. WRF Source Codes // WRF user. — Boulder, Colorado, 2013. — Электронный ресурс: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html].