

Э.К. Исаев, С.В. Мостаманди, О.Г. Анискина

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА КАЧЕСТВО ПРОГНОЗА
АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЙОНЕ СО СЛОЖНОЙ ОРОГРАФИЕЙ**

E.K. Isaev, S.V. Mostamandi, O.G. Aniskina

**EVALUATION OF PARAMETRIZATIONS OF PHYSICAL PROCESSES
IN HYDRODYNAMIC MODEL ON THE QUALITY OF ATMOSPHERIC
PROCESSES FORECAST IN AREAS WITH COMPLEX RELIEF**

Проанализировано влияние разных параметризаций физических процессов на качество моделирование с использованием гидродинамической мезомасштабной модели WRF на территории со сложным рельефом на примере Киргизии. Рассмотрено качество прогноза в зависимости от рельефа местности. Определен оптимальный набор параметризаций физических процессов.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, параметризация, WRF, качество прогноза.

The article analyzes the influence of different 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 has been considered depending on the terrain. The optimal set of parameterizations of physical processes has been determined.

Key words: hydrodynamic modeling, parameterization, WRF, quality of the forecast.

Прогноз полей метеорологических величин в горной местности является крайне сложной задачей из-за влияния, которое орография оказывает на формирование мезомасштабной циркуляции и теплового режима атмосферы. Наличие орографических, и как следствие, термических и динамических неоднородностей подстилающей поверхности приводит к появлению особенностей в развитии атмосферных процессов. Задача составления прогноза погоды в местности со сложным рельефом усложняется при использовании гидродинамического подхода. Это объясняется тем, что в этом случае мезомасштабные особенности рельефа способствуют возникновению явлений и процессов подсеточного масштаба, которые требуют особого подхода к своему описанию — параметризации. Целью данной работы является усовершенствование системы гидродинамического моделирования атмосферных процессов для повышения качества гидродинамического прогноза погоды в горной местности. В этой, как и в предыдущих работах [2] и [3], в качестве исследуемого региона была выбрана территория Киргизии, где 94 % территории занимают горы с высотой около 3 000 м над уровнем моря.

Для описания эволюции атмосферных процессов на территории Киргизии использовалась гидродинамическая мезомасштабная модель WRF [5]. Одной из важнейших

задач работы является определение оптимального набора методов параметризации физических процессов.

Область моделирования охватывает всю территорию Киргизии, а также некоторые страны Центральной Азии. Для корректного описания процессов используется равноугольная коническая проекция Ламберта в декартовой системе координат. Прогностическая сетка содержит 281 узел с запад на восток и 186 узлов с юга на север, горизонтальное разрешение 5 км и 35 уровнями по вертикали, шаг по времени 30 секунд. Начальные и граничные условия получены из реанализа Национального Центра Атмосферных Исследований (NCAR) [4].

При проведении численных экспериментов было рассчитано 30 прогнозов сроком 24 ч для апреля 2014 г. При верификации прогнозов использовались результаты наблюдения на 31 метеорологической станции. Исследовалось влияние параметризации конвекции, микрофизики облаков, длинноволновой и коротковолновой радиации, приземного и пограничного слоёв атмосферы, процессов на подстилающей поверхности. В численных экспериментах было использовано 8 различных комбинаций параметризаций физических процессов, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Конфигурации параметризаций физических процессов, используемые в работе

№ комбинаций	Схемы параметризации						
	Микро-физических процессов	Длинно-волновой радиации	Коротко-волновой радиации	Приземного слоя	Почвы	Пограничного слоя	Конвекции
1	WSM6	RRTM	Dudhia	MM5	Noah	YSU	Нет
2	Lin	RRTM	Dudhia	MO	Noah	MYJ	KF
3	Lin	RRTM	Dudhia	QNSE	Noah	QNSE	KF
4	Lin	RRTMG	RRTMG	MO	Noah	MYJ	KF
5	Lin	RRTMG	RRTMG	MO	Noah	BL	GR
6	WSM6	RRTM	Dudhia	MO	Noah	MYJ	GR
7	WSM6	RRTMG	RRTMG	MO	Noah	BL	KF
8	WSM6	RRTMG	RRTMG	QNSE	Noah	QNSE	KF

Рассматривались следующие параметризации:

- микрофизика облаков при помощи параметризаций Лина (Lin) и спектральной модели 6 (WSM6) [1];
- длинноволновая радиация при помощи параметризаций Млоуера Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) и модифицированной RRTMG [1];
- коротковолновая радиация при помощи параметризаций Дудья (Dudhia) и RRTMG [1];
- приземный слой при помощи параметризаций MM5, теория подобия Монина-Обухова (MO) и QNSE [1];
- процессы на поверхности и в почве при помощи параметризации унифицированной модели Noah [1];

- пограничный слой при помощи параметризаций университета Ёнсей (YSU), Меллора-Ямады-Янича (MYJ), Quasi-normal Scale Elimination (QNSE), Божул-Лакаре (BL) [1];
- конвекция при помощи параметризаций Каина-Фритша (KF), ансамблевой схемы Грелла (GR) [1].

В работах [2] и [3] описаны эксперименты по оценке влияния параметризации конвекции на качество прогноза осадков. В результате этих исследований был сделан вывод о том, что лучшей является совместное использование параметризации конвекции по схеме Каина-Фритша и микрофизики по схеме WSM6. Так как в атмосфере существуют очень сложные прямые и обратные (положительные и отрицательные) связи между всеми процессами, то и параметризации должны эти связи описывать оптимальным образом. Параметризации всех физических процессов в гидродинамической модели атмосферы взаимодействуют между собой, но описать сложные связи между процессами удаётся не всегда. Использование определённой схемы параметризации может давать хорошие результаты для прогноза одной метеорологической величины и ухудшать другие прогнозы. Поэтому и исследовалась оптимальная комбинация параметризаций физических процессов.

Для оценки качества прогнозов рассчитывались средняя абсолютная (δ), систематическая (ϵ) и квадратическая (σ) ошибки прогнозов, коэффициенты корреляции (r) между прогностическими и фактическими полями метеорологических величин по результатам 233 численных экспериментов. Для исследования качества прогноза ветра использовалась методика, основанная на составлении и анализе матрицы сопряженности [6].

Значительная сложность рельефа — глубокая и различная экспозиция горных склонов по отношению к солнцу и потокам воздуха — создаёт исключительные местные особенности, которые усложняют и прогноз метеорологических величин и его верификацию. Учитывая, что прогноз будет использован в конкретной точке, для верификации выбирались не самые ближайшие к модельным узлам станции, а станции с самыми большими коэффициентами корреляции и самыми маленькими значениями средней абсолютной ошибки, которые рассчитывались по ансамблю прогностических полей. Для примера на рис. 1 представлен регион, где между станцией Чаткал и ближайшими модельными узлами под номером 3 и 2 находится возвышенность с максимальной высотой 2000 м, которая определяет различную циркуляцию на станции Чаткал и в ближайших узлах модельной сетки. Поэтому измерения на станции Чаткал не могут быть использованы для верификации прогноза в узлах 2 и 3. Несмотря на отдаленность, узел под номером 1 имеет сходные циркуляционные характеристики и высоту над уровнем моря со станцией Чаткал и поэтому именно он использовался в верификации. Подобный анализ был проведён для всех модельных узлов.

После проведения численных экспериментов, расчёта ошибок прогноза и анализа полученных результатов было определена лучшая комбинация параметризаций физических процессов. Так как объем статьи ограничен, значение оценки качества прогнозов метеорологических величин приведём только для лучшей (№ 7, табл. 2) и худшей (№ 2, табл. 3) из комбинаций.

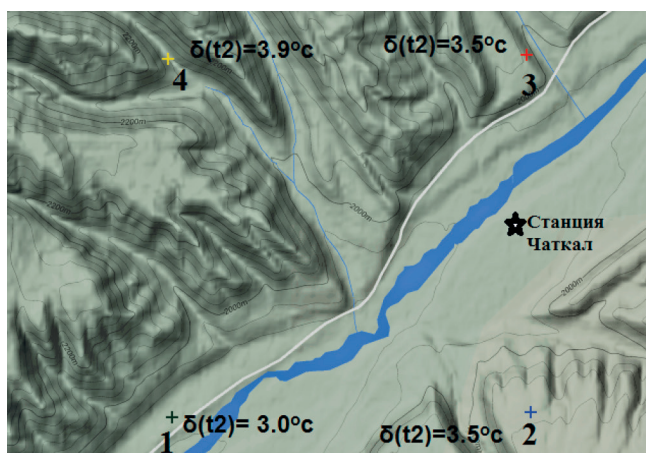


Рис. 1. Пример расположения узлов модельной сетки и метеорологической станции, данные в которых участвуют в верификации

При анализе полученных результатов обнаружено, что на некоторых станциях ошибки очень большие. Например, на станции под номером 11 и 27 абсолютные ошибки прогноза температуры составляют 9,2 и 8,0 °С, соответственно (табл. 2). В процессе тщательного изучения обнаружена причина таких больших ошибок. Оказывается модельный узел и станция находятся на разных высотах. Например, между станцией Ит-Агар, используемой для верификации, и модельным узлом под номером 1, разница высоты составляет 724 м. Поэтому для учета разницы высоты вводилась поправка, рассчитываемая по формуле [6]:

$$\Delta T_h = \Delta H \Delta \gamma, \quad (1)$$

где ΔH — разница высот; $\Delta \gamma$ — среднее значение сухо- и влажно-адиабатического градиента равной 0,8 °С/100 м.

При введении поправки на высоту наблюдается уменьшение средних абсолютных, средних квадратических и средних систематических ошибок. Например, на станции под номером 11 значение средней абсолютной ошибки уменьшилась с 9,2 до 3,2 °С, средней квадратической ошибки с 9,8 до 4,1 °С, средней систематической ошибки с –9,1 до –2,1 °С. Но все еще остаются больше допустимой нормы. Это можно объяснять сложностью рельефа и в дальнейшем планируются эксперименты с меньшим шагом по пространству.

На станции под номером 2 введение поправки не сказалось на величине ошибки, так как разница высот невелика, а станция и узел попадают в зону с одинаковыми циркуляционными особенностями. Результаты прогноза температуры на этой станции представлены на рис. 2. В основном, как видно из графика, представленного на рис. 2, модель занижала значение температуры. В некоторых ситуациях температура завышалась. В результате анализа была выявлена связь между завышением значения температуры и выпадением осадков.

Таблица 2

Оценки качества прогноза для лучшей конфигурации параметризаций модели

№ станции	Оцениваемая величина											
	Скорость ветра u , м/с				Скорость ветра v , м/с				Температура, °C			
	δ	σ	ε	r	δ	σ	ε	r	δ	σ	E	r
1	2,0	2,7	0,5	0,3	2,2	2,8	-0,1	0,6	3,8	5,8	1,0	0,5
2	2,3	1,5	2,3	0,4	3,1	3,9	2,3	0,1	1,7	2,2	-0,9	0,9
3	2,2	3,0	0,6	0,3	1,7	1,3	1,7	0,3	4,0	6,0	1,4	0,6
4	2,4	3,1	0,4	0,3	1,6	1,3	1,6	0,0	3,5	5,7	0,5	0,5
5	1,8	2,6	0,8	0,2	2,6	3,2	1,7	0,1	3,5	5,1	0,3	0,6
6	2,8	1,7	2,8	0,4	2,2	2,8	1,0	0,2	5,2	6,3	-2,1	0,5
7	3,3	4,4	2,3	0,3	2,3	1,5	2,3	0,1	5,0	5,8	-5,0	0,7
8	2,7	3,3	-0,8	0,4	4,3	5,0	3,3	-0,2	5,9	7,3	0,4	0,5
9	1,4	2,2	-0,2	0,5	1,2	1,6	-0,5	0,5	3,9	6,0	10,5	0,3
10	2,7	3,5	0,7	0,3	3,0	3,6	-1,2	0,5	3,6	5,0	1,3	0,6
11	2,7	3,1	-0,7	0,3	3,6	4,6	0,4	-0,1	9,2	9,8	-9,2	0,7
12	1,5	2,3	0,5	0,6	2,4	3,0	0,3	0,4	3,1	4,1	-0,7	0,7
13	3,4	6,7	0,0	0,5	3,3	6,3	1,4	0,3	3,4	5,1	1,3	0,7
14	2,8	4,2	0,0	0,5	2,7	3,5	0,9	0,3	3,5	5,6	2,1	0,7
15	3,2	1,8	3,2	0,5	3,0	1,7	3,0	0,2	2,7	4,6	0,6	0,8
16	3,3	4,4	-0,4	0,6	3,0	3,9	1,4	0,0	2,5	3,4	0,6	0,9
17	2,0	2,6	1,2	0,5	2,7	1,6	2,7	0,3	3,9	5,5	1,6	0,6
18	2,5	3,3	1,1	0,0	3,1	1,8	3,1	0,3	2,5	3,4	-0,8	0,8
19	3,0	1,7	3,0	0,2	5,9	2,4	5,9	0,3	6,1	7,0	-6,0	0,7
20	3,4	4,7	1,8	-0,3	2,5	3,2	1,1	0,6	2,6	3,8	-1,9	0,5
21	1,4	2,1	0,9	0,2	3,8	1,9	3,8	0,1	3,1	4,0	-0,1	0,6
22	2,4	3,1	0,6	0,3	2,4	3,2	0,2	0,2	3,5	5,1	0,8	0,7
23	2,7	3,8	-0,2	0,4	2,0	1,4	2,0	0,2	3,2	4,8	0,0	0,7
24	5,8	8,2	-3,0	0,4	2,1	2,7	-0,4	0,2	2,9	3,8	0,3	0,6
25	2,1	1,5	2,1	0,4	2,0	1,4	2,0	0,1	3,1	3,9	-1,8	0,5
26	2,3	3,3	1,3	0,2	2,5	3,1	1,3	0,0	3,7	4,9	-2,0	0,6
27	2,7	3,5	0,0	0,6	2,5	3,1	1,4	0,4	4,1	5,2	-2,9	0,6
28	3,2	4,2	2,2	0,0	4,2	5,5	2,2	0,3	8,0	8,6	-8,0	0,6
29	4,7	5,7	4,2	0,1	3,6	4,4	2,7	0,0	3,0	4,0	-2,1	0,6
30	3,2	4,1	0,8	0,4	2,1	2,7	0,6	0,0	6,1	9,3	-5,0	0,4
31	2,0	3,0	0,9	0,4	1,7	2,5	0,8	0,1	5,2	6,3	-1,3	0,4

Таблица 3

Оценки качества прогноза для худшей конфигурации параметризаций модели

№ станции	Оцениваемая величина											
	Скорость ветра u , м/с				Скорость ветра v , м/с				Температура, °C			
	δ	σ	ε	r	δ	σ	ε	r	δ	Σ	ε	r
1	1,9	2,6	0,1	0,3	2,2	2,9	-0,1	0,0	4,0	5,6	-0,1	0,4
2	2,2	1,5	2,2	0,4	3,8	4,8	3,0	0,0	2,0	2,6	-1,5	0,9
3	1,8	2,3	0,0	0,4	1,7	1,3	1,7	0,0	4,2	6,0	0,3	0,5
4	2,0	2,5	-0,1	0,3	1,7	1,3	1,7	0,0	3,7	5,5	-1,1	0,5
5	1,5	2,1	0,0	0,3	2,5	3,2	1,6	0,0	3,5	5,0	-1,1	0,6
6	3,2	1,8	3,2	0,3	2,1	2,5	1,0	0,0	5,9	7,0	-3,3	0,3
7	2,7	3,4	1,8	0,3	2,0	1,4	2,0	0,0	6,0	6,8	-5,9	0,6
8	3,0	3,6	-1,6	0,4	4,3	5,0	3,0	0,0	5,8	6,8	-1,5	0,5
9	1,2	1,9	-0,3	0,3	1,5	2,0	-0,7	0,0	4,2	5,4	8,2	0,4
10	2,4	3,2	0,2	0,2	3,2	3,7	-1,6	0,0	3,5	4,8	0,3	0,5
11	2,9	3,4	-1,6	0,4	3,6	4,6	-1,5	0,0	10,1	10,7	-10,1	0,7
12	1,4	1,8	-0,5	0,5	2,1	2,5	-0,6	0,0	3,4	4,6	-2,4	0,7
13	3,4	7,3	-0,8	0,5	3,4	6,8	1,8	0,0	3,8	5,5	0,7	0,7
14	2,7	4,4	-0,5	0,5	2,8	3,7	1,4	0,0	3,4	5,4	1,2	0,7
15	3,2	1,8	3,2	0,6	2,9	1,7	2,9	0,0	2,8	4,7	-0,5	0,8
16	2,9	4,0	-0,5	0,7	2,8	3,6	1,5	0,0	2,7	3,8	-0,3	0,8
17	2,0	2,5	1,2	0,4	3,2	1,8	3,2	0,0	3,7	5,3	0,6	0,6
18	2,3	3,0	1,1	0,0	4,2	2,1	4,2	0,0	2,8	3,7	-1,6	0,8
19	1,7	1,3	1,7	0,1	5,5	2,4	5,5	0,0	6,9	7,8	-6,9	0,7
20	2,3	3,3	0,2	0,0	2,5	3,3	0,3	0,0	3,5	4,9	-3,2	0,4
21	0,8	1,2	0,4	0,3	3,5	1,9	3,5	0,0	3,3	4,1	-1,5	0,6
22	2,3	3,0	-0,2	0,3	2,6	3,2	0,5	0,0	3,4	4,8	0,0	0,7
23	2,8	4,1	-0,7	0,3	2,3	1,5	2,3	0,0	3,3	4,7	-0,9	0,7
24	5,6	8,0	-3,9	0,5	2,0	2,5	-0,6	0,0	2,9	3,6	-0,5	0,6
25	2,0	1,4	2,0	0,4	2,4	1,5	2,4	0,0	3,8	4,5	-2,9	0,5
26	1,8	2,5	1,0	0,2	3,4	4,2	2,4	0,0	4,7	5,8	-3,6	0,5
27	2,8	3,6	-0,9	0,7	2,7	3,4	1,9	0,0	5,0	6,1	-4,4	0,5
28	2,4	3,1	0,5	0,1	4,1	5,2	2,7	0,0	9,2	9,8	-9,2	0,6
29	2,9	3,8	2,5	0,2	3,6	4,5	2,8	0,0	3,7	4,9	-3,4	0,5
30	3,1	3,9	0,0	0,4	2,2	2,8	0,9	0,0	6,7	7,9	-6,0	0,4
31	1,7	2,5	0,2	0,5	1,7	2,3	0,7	0,0	5,5	6,6	-3,4	0,4

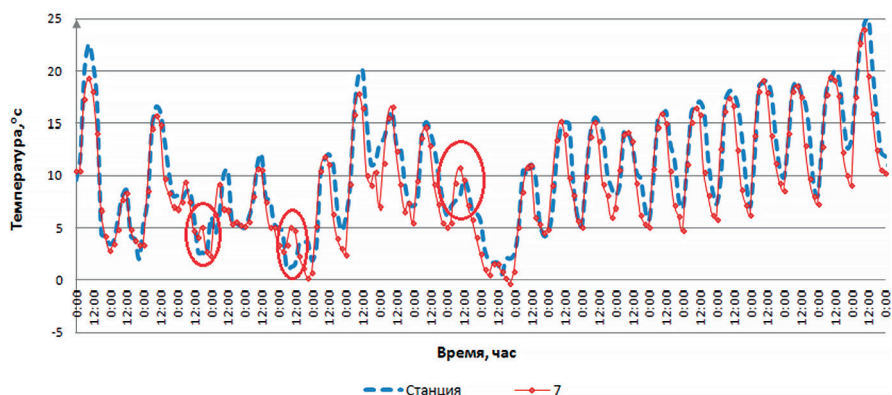


Рис. 2. Значение температуры на метеорологической станции Исфана

На рис. 3 представлен график изменения температуры на станции номер 11. Прогностическое и фактическое значения сильно отличаются. Эта ошибка объясняется тем, что узел сетки при ясном небе попадает в зону тени от гор и за счет этого происходит занижение температуры, что не учитывается моделью. Так же наблюдается связь между завышением значения температуры и выпадением осадков.

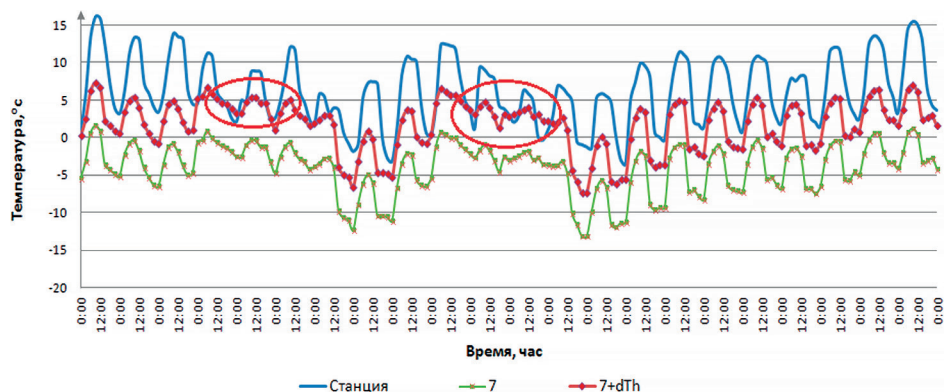


Рис. 3. Значение температуры на метеорологической станции Ит-Агар

Для оценки прогноза скорости ветра и количества осадков использовались градации, по которым построены таблицы сопряженности (табл. 4). В табл. 4 используются следующие обозначения: *a* — число случаев попадания прогностического и фактического значений в одну градацию; *b* — число случаев попадания прогностического значения и не попадания фактического значения в заданную градацию; *c* — число случаев попадания фактического значения и не попадания прогностического значения в заданную градацию; *d* — число случаев не попадания прогностического и фактического значений в одну градацию.

Таблица 4

Таблица сопряженности прогнозов

Прогноз по модели	Наблюдение на метеорологической станции		
	Да	Нет	Σ
Да	a	b	$a + b$
Нет	c	d	$c + d$
Σ	$a + c$	$b + d$	$N = a + b + c + d$

Таблицу сопряженности можно представить одним индексом, называемый коэффициентом успешности прогнозов или индекс Heidke Skill Scores (HSS) [6]:

$$HSS = \frac{2(ab - bc)}{[(a + b)(c + d) + (a + b)(b + d)]}. \quad (2)$$

Коэффициент успешности прогнозов равен единице, когда все прогнозы оправдались, и равен нулю, когда прогноз не оправдался ни в одном случае. По этим критерием выбиралась лучшая конфигурация параметризаций модели — значение коэффициента успешности прогнозов должно быть, по крайней мере, положительным.

Для оценки прогноза осадков, были ведены градации: 0–5 мм/12 ч, 5–10 мм/12 ч, 10–30 мм/12 ч, 30–100 мм/12 ч. По этим градациям строились таблицы сопряженности и рассчитывались коэффициенты успешности HSS .

По анализу коэффициента успешности HSS (рис. 4) лучшими являются конфигурации 7 и 4, когда значение HSS доходит на некоторых станциях до 1. Для всех конфигураций в градации 30–100 мм/12 ч HSS равно нулю, так как в рассматриваемых ситуациях не встречалось осадков такой интенсивности.

Были рассчитаны среднее значение коэффициента успешности HSS для всей территории. По средним значениям HSS (рис. 5) лучшими являются комбинации 4 и 7, а худшими комбинации 1 и 2. Комбинация под номером 7 является лучшей потому, что в ней используется схемы параметризации микрофизических процессов WSM6, которая учитывает 6 типов гидрометеоров, как уже показана в работе [3] и схема параметризации конвекции Каина-Фритша ранее определенная в работе [2] лучшей схемой для прогноза осадков.

Оптимальной для прогноза полей температуры и осадков над территорией Киргизии является конфигурация под номером 7.

Для оценки качество прогноза ветра были выбраны следующие градации: 0–5 м/с, 5–10 м/с, 10–15 м/с, 15–20 м/с.

По анализу коэффициента успешности HSS (рис. 6) лучшей комбинации 7 и 2. Как видно из анализа рис. 6, на некоторых станциях значение HSS отрицательно. Это означает, что случайный прогноз в данном случае лучше.

Отрицательное значение индекса HSS , например, на станции под номером 10, связано с усилением ветра в котловинах, с образованием зон конвергенции и с обтеканием горных массивов (рис. 6).

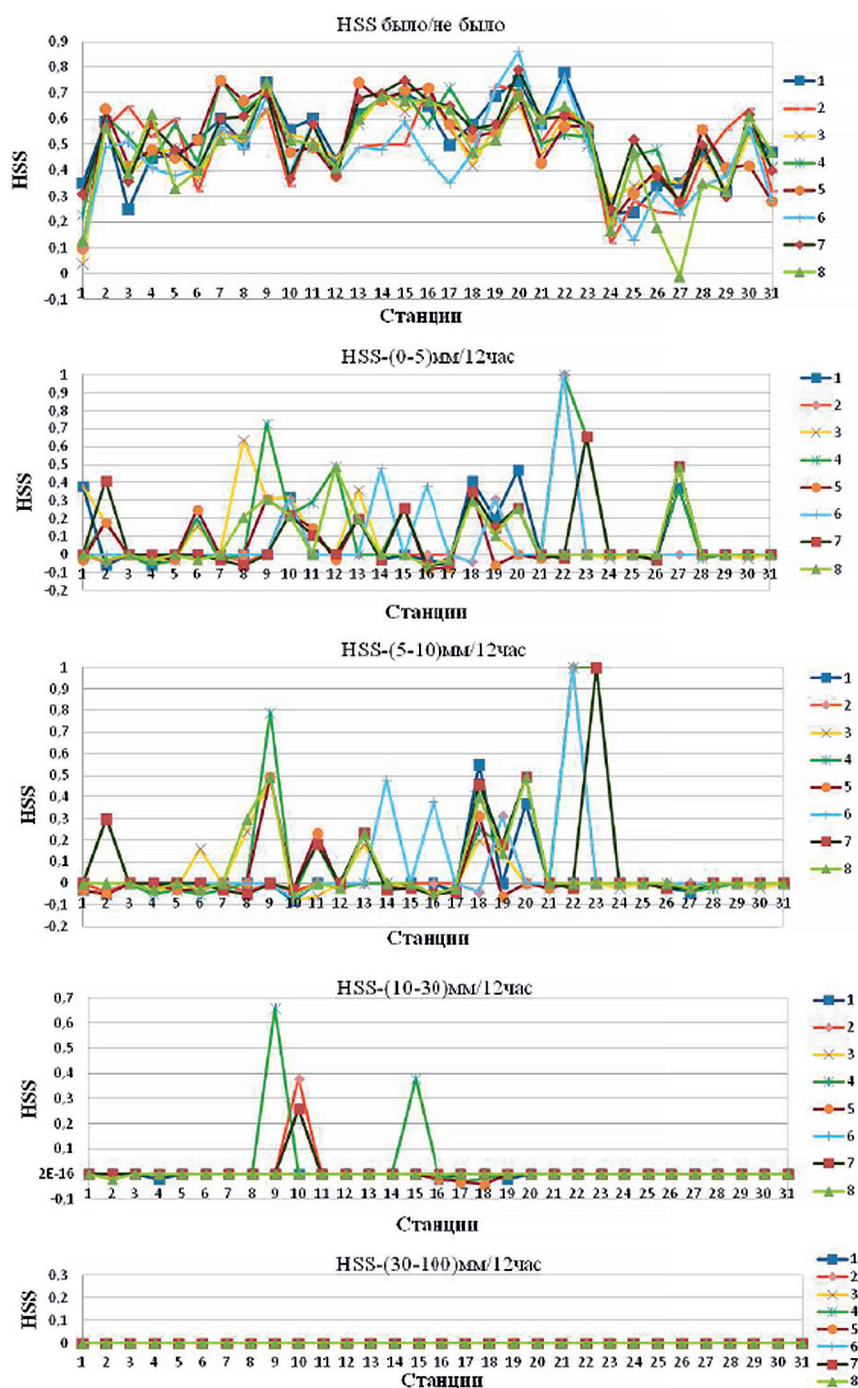
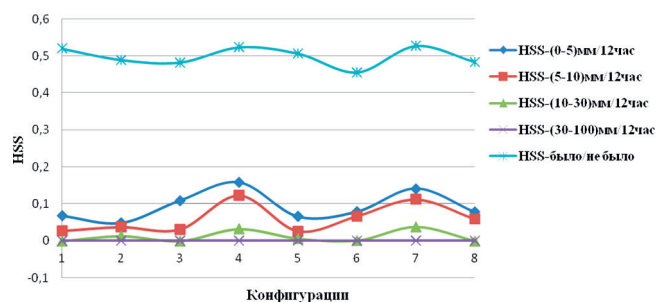
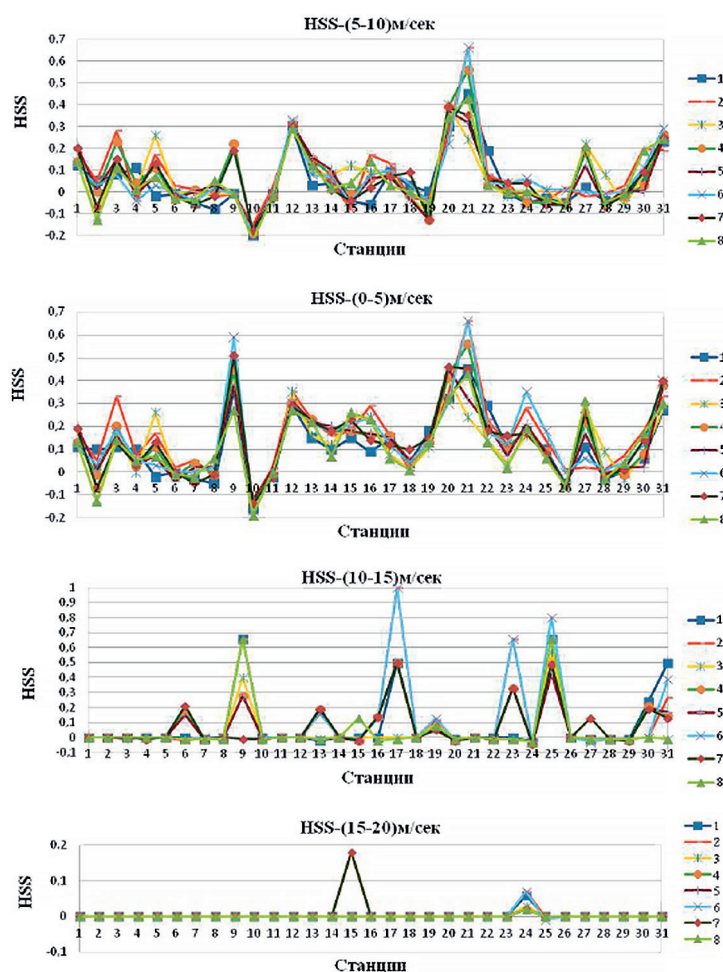


Рис. 4. Значение HSS по градациям осадков для каждой комбинации параметризаций

Рис. 5. Среднее значение HSS по градиентам осадков для каждой комбинацииРис. 6. Значение HSS по градиентам скорости ветра для каждой комбинации

Были рассчитаны среднее значение коэффициента успешности HSS для всей территории (рис. 7). И по средним значениям HSS лучшей является комбинации 2 и 7.

Обобщая результаты проведённых экспериментов, можно сделать вывод о том, что оптимальной конфигурацией параметризаций конвекции, облаков, радиационных и турбулентных потоков является комбинация параметризаций номером 7.

Для этой конфигурации модели построены диаграммы рассеяния составляющих скорости ветра u и v (рис. 8) и осадков (рис. 9). По диаграммам видно, что модель занижает значение скорости ветра и осадков.

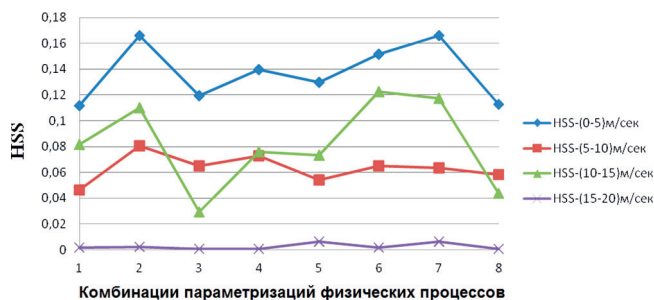


Рис. 7. Среднее значение HSS по градациям скорости ветра для каждой комбинации

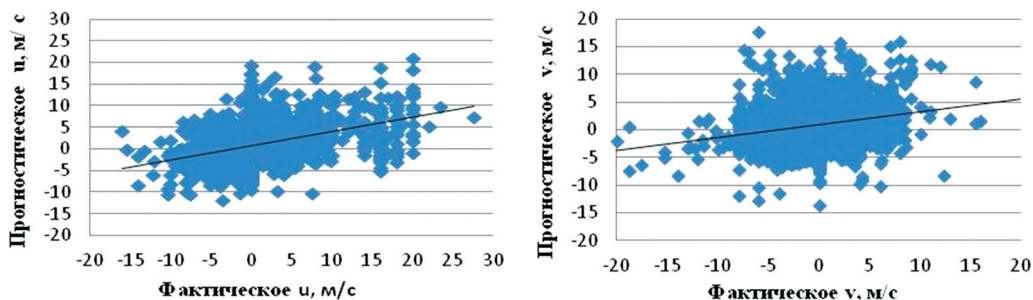


Рис. 8. Диаграмма рассеянности для составляющих скорости ветра

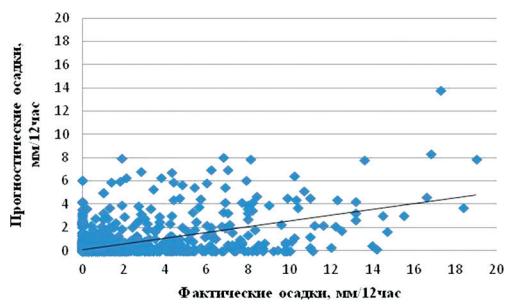


Рис. 9. Диаграмма рассеянности осадков для конфигурации 7

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- для прогноза атмосферных процессов для всей территории Киргизии лучшей комбинацией параметризаций физических процессов является конфигурация под номером 7. В этой конфигурации использовались следующие параметризации микрофизики облаков WSM6, длинноволновая и коротковолновая радиация RRTMG, приземный слой при помощи параметризации теории подобия Монина-Обухова, процессы на поверхности и в почве при помощи параметризации унифицированной модели Noah, пограничный слой схема параметризации Божул-Лакаре, конвекция при помощи параметризации Каина-Фритша.
- для улучшения прогноза скорости ветра надо учитывать подсеточный рельеф и разработать методику его учёта.

В дальнейшем планируется продолжить исследования по гидродинамическому моделированию атмосферных процессов в Киргизии и повысить его качество переходом на сетки с лучшим разрешением и ассимиляцией данных наблюдений.

Литература

1. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. // В сб.: 80 лет Гидрометцентру России. — М.: Триада ЛТД, 2010, с. 94–134.
2. Исаев Э.К. Гидродинамическое моделирование атмосферных процессов в Кыргызстане. // Вестник КРСУ, 2014, т. 14, вып. 7, с. 49–53.
3. Исаев Э.К., Анискина О.Г. Влияние схем параметризации микрофизических процессов на качество прогноза атмосферных процессов в районе со сложным рельефом на примере территории Кыргызстана. // Учёные записки, 2015, № 38, с. 118–125.
4. National Centers for Atmospheric Research's. CSIL Research Data Archive. — Электронный ресурс: [<http://www.rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#access>].
5. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. // NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, 2008. — DOI: 10.5065/D68S4MVH.
6. Eumetcal European Virtual Organisation for Meteorological Training: Verification methods. — Электронный ресурс: [http://www.eumetcal.org/resources/ukmeteocal/verification/www/english/msg/ver_catg_forec/uos3/uos3_ko1.htm] (дата обращения: 05.04.2015).