

УДК 551.509.313.4 (575.2)

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В КЫРГЫЗСТАНЕ

Э.К. Исаев

Проанализировано влияние разных схем параметризации конвекции в гидродинамической мезомасштабной модели WRF на прогноз метеорологических величин на территории Кыргызстана. Рассмотрено качество прогноза осадков в зависимости от географического районирования. Определен оптимальный набор параметризаций физических процессов.

*Ключевые слова:* гидродинамическое моделирование; прогноз осадков; конвекция; параметризация; WRF; качество прогноза.

## HYDRODYNAMIC MODELING OF ATMOSPHERE PROCESSES IN KYRGYZSTAN

E.K. Isaev

The article analyzes the influence of different convection parameterization schemes in hydrodynamic WRF mesoscale model on forecast of meteorological parameters on the territory of Kyrgyzstan. The quality of forecast precipitation has been considered depending on geographical zoning. The optimal set of parameterizations of physical processes has been determined.

*Key words:* hydrodynamic modeling; precipitation forecast; convection; parameterization; WRF; quality of the forecast.

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 конвективных процессов. Исследовано влияние разных схем параметризации конвекции на качество прогноза

количества осадков и улучшение качества прогноза погоды в целом.

В работе модель WRF используется с динамическим ядром ARW, которое 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 и с использованием вертикальной координаты  $\eta$ , которая напоминает сигма-координату, но отличается от нее тем, что определяется не через полное давление, а через его гидростатическую составляющую.

При адаптации модели WRF для территории Кыргызстана в результате предварительных численных экспериментов было установлено, что оптимальной областью моделирования является сетка размером 131 узел с запада на восток и 69 узлов с юга на север с горизонтальным разрешением 10 км и 27 уровнями по вертикали. Для корректного описания процессов используется равноугольная коническая проекция Ламберта в декартовой системе координат. Таким образом, область моделирования охватывает всю территорию Кыргызстана, а также некоторые страны Центральной Азии (рисунк 1).

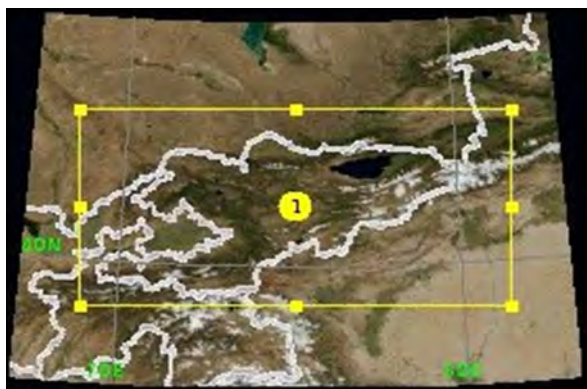


Рисунок 1 – Область моделирования

Таблица 1 – Схемы параметризации конвекции, используемые в работе

| Параметризация конвекции               | Обозначение схемы |
|--|-------------------|
| Без конвекции                          | NC                |
| Новая эта схема Каина–Фритша [4–6]     | KF                |
| Схема Беттса–Миллер–Янич [7]           | BMJ               |
| Ансамблевая схема Грелла–Дэвени [8, 9] | GD                |
| Ансамблевая схема Грелла 3d [8]        | G3D               |
| Старая схема Каина–Фритша [6]          | OKF               |

Для того чтобы решать задачи прогноза погоды необходимо определить начальные и граничные условия. 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, прилегающей к поверхности Земли. В данной работе все начальные и граничные данные получены из реанализа Национального Центра атмосферных исследований (NCAR) [2].

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 [3]. По каждой из этих областей по данным Кыргызгидромета получена информация об осадках – дата выпадения и количество. Численные эксперименты по оценке качества прогноза и определения оптимального набора параметризаций проводились с привязкой к этим датам. Всего было проведено 234 численных эксперимента по гидродинамическому моделированию процессов по всей территории Кыргызстана.

Для верификации прогнозов использовались результаты наблюдения за осадками на станциях 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 конвекции. В численных экспериментах был использован стандартный набор параметризаций физических процессов WRF, а варьировался метод параметризации конвекции (таблица 1), чье влияние на качество прогноза изучалось.

Таблица 2 – Средние абсолютные ошибки прогнозов по климатической области Юго-Западный Кыргызстан

| Оцениваемая величина | Схемы параметризации конвекции |      |      |      |      |      |
|----------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
|                      | NC                             | KF   | BMJ  | GD   | G3D  | OKF  |
| Температура, К       | 1,58                           | 1,58 | 1,58 | 1,58 | 1,58 | 1,58 |
| Давление, гПа        | 1,73                           | 1,67 | 1,78 | 1,76 | 1,78 | 1,72 |
| Ветер, м/с           | 1,17                           | 1,08 | 1,05 | 1,13 | 1,09 | 1,21 |
| Осадки, мм/сутки     | 15,59                          | 7,89 | 7,55 | 7,24 | 8,03 | 5,69 |

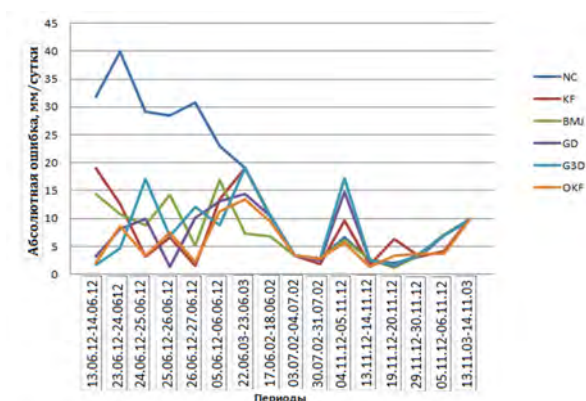
Для оценки качества прогнозов были рассчитаны абсолютные ошибки и средние абсолютные ошибки прогнозов. По этим критериям выбиралась лучшая конфигурация модели.

Анализ численных экспериментов по климатической области Юго-Западный Кыргызстан показал, что по абсолютным ошибкам прогноза осадков (рисунок 2а) лучшей схемой является старая схема Каина–Фритша, где абсолютная ошибка колеблется от минимума 1,4 мм/сутки до максимума 13,4 мм/сутки. При отсутствии параметризации конвекции получается худший прогноз, где абсолютная ошибка меняется от минимума 2,0 мм/сутки до максимума 39,9 мм/сутки. Также по средней абсолютной ошибке (таблица 2) худший прогноз без параметризации конвекции – средняя абсолютная ошибка составляет 15,59 мм/сутки.

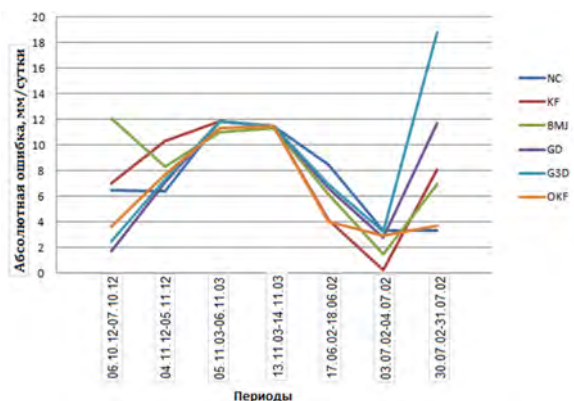
Из анализа данных таблицы 2 видно, что лучший результат даёт использование старой схемы Каина–Фритша со средней абсолютной ошибкой 5,69 мм/сутки.

Средние абсолютные ошибки прогнозов температуры, давления, ветра (таблица 2) незначительно отличаются в зависимости от схемы параметризации конвекции. Скорее всего, большее влияние на прогноз этих метеорологических величин оказывает параметризация пограничного и приземного слоя. Работа по изучению этих процессов будет проведена в дальнейшем.

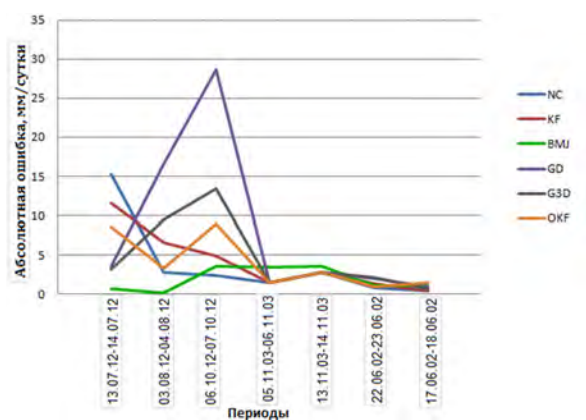
По результатам численных экспериментов в климатической области Северный и Северо-Западный Кыргызстан выявлено, что по абсолютным ошибкам прогноза осадков (рисунок 2б) лучшей является старая схема Каина–Фритша, где абсолютная ошибка колеблется от минимума 2,9 мм/сутки до максимума 11,5 мм/сутки. Худшей схемой является ансамблевая схема Грелла (3d), где минимум 2,5 мм/сутки и максимум 18,8 мм/сутки со средними абсолютными ошибками (таблица 3).



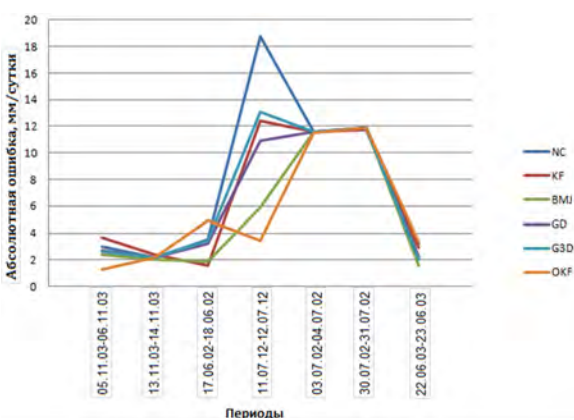
а) Юго-Западный Кыргызстан



б) Северный и Северо-Западный Кыргызстан



в) Северо-Восточный Кыргызстан



г) Внутренний Тянь-Шань

Рисунок 2 – Абсолютные ошибки прогнозов осадков по климатическим областям Кыргызстана

Таблица 3 – Средние абсолютные ошибки прогнозов по климатической области Северный и Северо-Западный Кыргызстан

| Оцениваемая величина | Схемы параметризации конвекции |      |      |      |      |      |
|----------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
|                      | NC                             | KF   | BMJ  | GD   | G3D  | OKF  |
| Температура, К       | 1,20                           | 1,14 | 1,17 | 1,12 | 1,10 | 1,07 |
| Давление, гПа        | 1,21                           | 1,21 | 1,16 | 1,21 | 1,23 | 1,19 |
| Ветер, м/с           | 1,68                           | 1,51 | 1,24 | 1,41 | 1,59 | 1,56 |
| Осадки, мм/сутки     | 7,34                           | 7,60 | 8,20 | 7,61 | 8,88 | 6,39 |

Из анализа численных экспериментов в климатической области Северо-Восточный Кыргызстан видно, что по абсолютным ошибкам прогноза осадков (рисунок 2в) лучшей схемой является схема Беттса–Миллера–Янича, где абсолютная ошибка колеблется от минимума 0,2 мм/сутки до максимума 3,6 мм/сутки. А как худшая схема проявляется ансамблевая схема Грелла–Девени, где

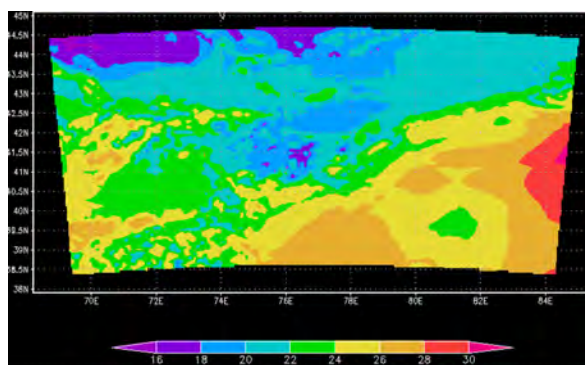
Таблица 4 – Средние абсолютные ошибки прогнозов по климатической области Северо-Восточный Кыргызстан

| Оцениваемая величина | Схемы параметризации конвекции |      |      |      |      |      |
|----------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
|                      | NC                             | KF   | BMJ  | GD   | G3D  | OKF  |
| Температура, К       | 0,57                           | 0,58 | 0,61 | 0,65 | 0,69 | 0,62 |
| Давление, гПа        | 2,36                           | 2,38 | 2,48 | 2,39 | 2,37 | 2,33 |
| Ветер, м/с           | 2,05                           | 2,10 | 1,97 | 2,13 | 2,16 | 2,02 |
| Осадки, мм/сутки     | 3,70                           | 4,13 | 1,96 | 7,97 | 4,72 | 3,93 |

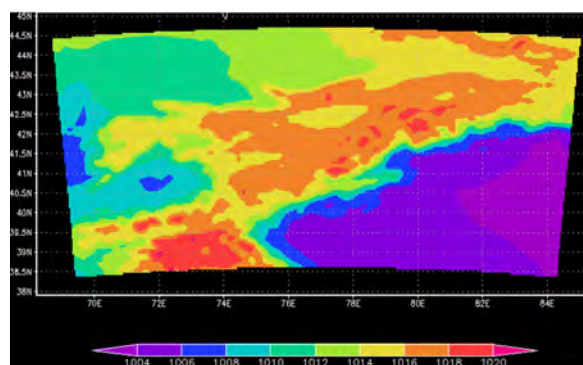
абсолютная ошибка меняется от минимума 0,9 мм/сутки до максимума 28,7 мм/сутки. Такие же результаты при оценке прогнозов по средней абсолютной ошибке (таблица 4).

Из анализа результатов численных экспериментов по климатической области Северо-Восточный Кыргызстан можно сделать парадоксальный вывод – прогноз без параметризации конвекции

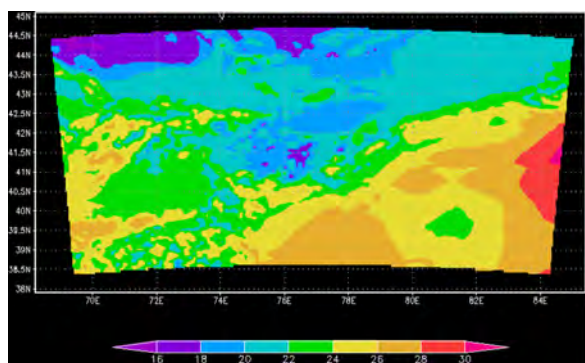




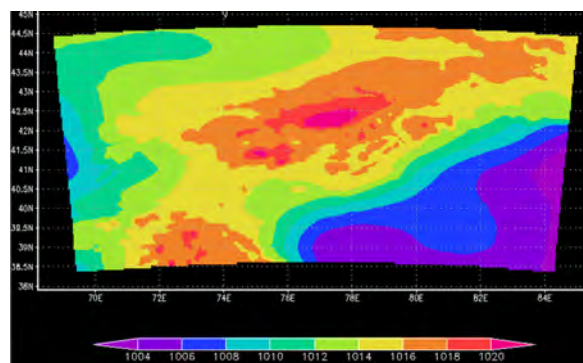
а1) Прогностическое поле температуры



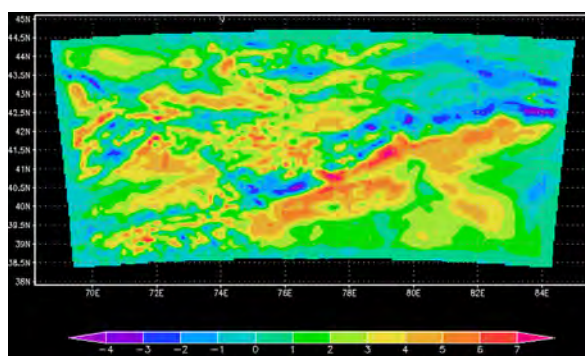
а2) Прогностическое поле давления



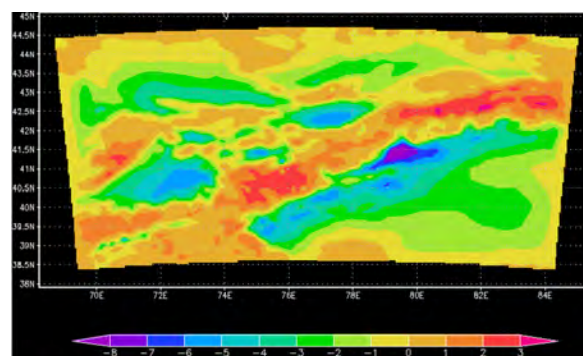
б1) Фактическое поле температуры



б2) Фактическое поле давления



в1) Ошибка прогноза температуры



в2) Ошибка прогноза давления

Рисунок 3 – Прогностические (а1, а2) и фактические (б1, б2) поля

показывает хорошую оправдываемость прогноза осадков (средняя абсолютная ошибка 3,7 мм/сутки (таблица 4) и минимум 0,42 мм/сутки, максимум 15,3 мм/сутки). Этот результат может быть объяснен следующим образом. По-видимому, это явление связано с большим влагозапасом атмосферы, который в отсутствии схемы параметризации конвекции полностью реализовался через параметризацию крупномасштабной конденсации. А большой влагозапас атмосферы связан с наличием

ем в области Северо-Восточный Кыргызстан озера Иссык-Куль, которое является источником влаги в атмосфере.

Анализ численных экспериментов по климатической области Внутренний Тянь-Шань показал, что и по абсолютным ошибкам прогноза осадков (рисунок 2г) и по средним абсолютным ошибкам (таблица 5) лучшей схемой является схема Бетса-Миллера-Янича, где абсолютная ошибка колеблется от минимума 1,6 мм/сутки до максимума

Таблица 5 – Средние абсолютные ошибки прогнозов по климатической области Внутренний Тянь-Шань

| Оцениваемая величина | Схемы параметризации конвекции |      |      |      |      |      |
|----------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
|                      | NC                             | KF   | BMJ  | GD   | G3D  | OKF  |
| Температура, К       | 1,73                           | 1,89 | 2,01 | 1,85 | 1,85 | 1,75 |
| Давление, гПа        | 0,74                           | 0,74 | 0,76 | 0,69 | 0,68 | 0,73 |
| Ветер, м/с           | 2,10                           | 1,96 | 2,00 | 2,03 | 1,95 | 1,98 |
| Осадки, мм/сутки     | 7,73                           | 6,61 | 5,32 | 6,39 | 6,69 | 5,51 |

11,9 мм/сутки, а худшая схема – схема без конвекции, где абсолютная ошибка меняется от минимума 3,0 мм/сутки до максимума 18,7 мм/сутки.

Если рассматривать весь Кыргызстан в целом, то лучшую оправдываемость прогноза осадков обеспечивает старая схема Каина–Фритша (таблицы 2–5). Прогностические и фактические поля давления и температуры по старой схеме Каина–Фритша приведены на рисунке 3. Анализ этих рисунков позволяет сделать вывод о хорошем качестве прогноза основных метеорологических величин.

Обобщая всё сказанное выше, можно сделать следующие выводы:

- для прогноза осадков в Западном Кыргызстане лучшей схемой параметризации конвекции является старая схема Каина–Фритша. В Северо-Восточном Кыргызстане и Внутреннем Тянь-Шане лучшей признана схема Беттса–Миллера–Янича.
- в целом по Кыргызстану старая схема Каина–Фритша обеспечивает хорошее качество прогноза осадков.
- недостатки прогнозов обусловлены, по крайней мере, частично, достаточно грубой для разрешения глубокой конвекции сеткой (10 км). Переход на более мелкие сетки может повысить качество прогноза.

В дальнейшем планируется продолжить исследования по гидродинамическому моделированию атмосферных процессов в Кыргызстане и повысить его качество с переходом на более мелкие сетки и выбором других параметризации физических процессов.

#### Литература

1. WRF Source Codes // WRF user [Electronic resource]: Boulder, Colorado. 2013. URL: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html)
2. National Centers for Atmospheric Research's [Electronic resource]: CSIL Research Data Archive. URL: <http://www.rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#access>
3. Справочник по климату. Вып. 32. Ч. IV. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 307 с.
4. Kain J.S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update / J.S. Kain // J. Appl. Meteor. 2004. Vol. 43. № 1. P.170–181.
5. Kain J.S., Fritsch J.M. A one dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization / J.S. Kain, J.M. Fritsch // J. Atmos. Sci. 1990. Vol. 47. № 1. P. 2784–2802.
6. Fritsch J.M., Chappell C.F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization / J.M. Fritsch, C.F. Chappell // J. Atmos. Sci. 1980. Vol. 37. P. 1722–1733.
7. Betts A.K., Miller M.J. A new convective adjustment scheme. II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass sets / A.K. Betts, M.J. Miller // Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1986. Vol.112. № 473. P. 693–709.
8. Grell G.A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations / G.A. Grell // Mon. Wea. Rev. 1993. № 121. P. 764–787.
9. Grell G.A., Deveny D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble / G.A. Grell, D. Deveny // Geoph. Res. Let., 2002. Vol. 9.