

*А.Л. Кондове*

## СРАВНЕНИЕ СХЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ В МОДЕЛИ WRF

*A.L. Kondowe*

## A COMPARISON OF PHYSICAL PARAMETERIZATION SCHEMES IN THE WRF MODEL

*В статье рассматривается влияние схем параметризации физических процессов на качество гидродинамического прогноза метеорологических величин в восточной Африке. Моделирование происходит с помощью мезомасштабной гидродинамической модели WRF. Оценивается чувствительность качества прогноза к комбинации различных схем параметризации микрофизики облаков, конвективных процессов и пограничного слоя атмосферы. По результатам экспериментов сделан вывод о том, что основным процессом, определяющим наличие и интенсивность осадков, является конвекция и скрытые потоки тепла. Определен лучший набор параметризаций физических процессов для разных регионов восточной Африки.*

*Ключевые слова: гидродинамический прогноз, осадки, Восточная Африка, мезомасштабная гидродинамическая модель WRF.*

*This article examines the role of physical parameterization schemes on the quality of hydrodynamic forecast of meteorological variables in eastern Africa. Simulations were conducted using numerical mesoscale weather and research forecasting (WRF) model. Sensitivity of the combination of cloud microphysics, cumulus and planetary boundary layer parameterization schemes has been evaluated. Results of numerical experiments depicted that, convection and latent heat fluxes are the main factors determining the presence and intensity of precipitation. The best set of parameterization schemes of physical processes in different regions of east Africa has been determined.*

*Keywords: Numerical forecast, rainfall, eastern Africa, mesoscale numerical WRF model.*

В последнее время для повышения точности прогноза погоды и климата используется ансамблевый подход. При создании ансамблей результатов моделирования и их интерпретации важную роль играет точность описания неадиабатических процессов (параметризации), происходящих в разных регионах земного шара в различные сезоны года.

Цель данного исследования — создание гидродинамической модели, позволяющей составить адекватный прогноз метеорологических величин и на ее основе составление схемы ансамблевого прогноза осадков, который очень сложен и актуален для Танзании. Важность качественного прогноза осадков связана с тем, что осадки в Восточной Африке (Танзания, Уганда, Кения) характеризуются большой пространственной и временной изменчивостью, что вызвано сложным рельефом, наличием больших внутренних озер (Виктория, Ньяса, Танганьика), влиянием Индийского океана, а также особенностями циркуляции синоптического (внутритропическая зона конвергенции, муссоны) и мезомасштаба [1]. Все это обуславливает погодные

и климатические различия в количестве осадков, режим которых создает влажные и засушливые районы, где серьезные засухи и малое количество осадков являются постоянной угрозой жизни [2].

Прогноз осадков невозможен без корректного описания основных метеорологических величин, основными из которых являются температура, влажность и скорость ветра. Только после того, как получен точный прогноз полей основных метеорологических величин, можно разработать хороший детерминированный и ансамблевый прогноз осадков [3, 4].

Для описания эволюции атмосферных процессов на территории Танзании применялась модель WRF — мезомасштабная гидродинамическая модель прогноза состояния атмосферы, созданная с целью обеспечить потребности как в оперативном прогнозе, так и в решении исследовательских задач [5].

Очевидно влияние разрешения модели на качество прогноза, что связано с детальностью описания эволюции и структуры атмосферных процессов. Но адекватность моделирования полей метеорологических величин также связана и с качеством описания подсеточных процессов, то есть с правильным выбором набора параметризаций.

Гидродинамическая мезомасштабная модель должна быть адаптирована к исследуемой территории, чтобы используемые параметризационные схемы лучшим образом описывали процессы в данном регионе.

Область моделирования в исследовании охватывает всю территорию Танзании и расположена в пределах от 28 до 42° в.д. и от 1 до 12° ю.ш. В численных экспериментах использовались две вложенные сетки с горизонтальным разрешением 15 и 5 км. Для корректного описания процессов в экваториальной зоне используется цилиндрическая проекция в декартовой системе координат. Начальные и граничные данные получены из результатов реанализа Национального Центра атмосферных исследований (NCAR) [6].

В исследовании изучалось влияние на образование осадков и качество прогноза следующих физических процессов и схем их параметризации.

1. *Микрофизика облаков.* Использовались следующие параметризации:

- а) схема Kessler — описывает осадки в жидком состоянии [7];
- б) схема Purdue Lin — учитывает пять видов гидрометеоров [8];
- в) схема WRF Single-Moment 6-Class (WSM6) — включает в себя описание процессов формирования льда, снега и крупы [9];
- г) схема Thompson — учитывает наличие в облаке льда, снега и крупы, концентрацию капель дождя и рассматривает эволюцию всех этих гидрометеоров во времени [10].

2. *Конвективные процессы.* Использовались следующие параметризации:

- а) схема Каина — Фритца (KF) — учитывает эффекты от мелкой и средней конвекции [11];
- б) схема Беттса — Миллера — Янича (BMJ) — рассматривает глубокую и мелкую конвекцию и их воздействие на профили температуры и влажности [12];
- в) ансамблевая схема Грелла — Дэвени (GD) — ансамблевый метод потоков масс, который учитывает восходящие и нисходящие потоки [13];
- г) трехмерная ансамблевая схема Грелла (G3d) — основана на гипотезе о квазиравновесном состоянии между членами ансамбля конвективных облаков,

учитывает эффект компенсационного опускания воздуха в окрестностях кучевых облаков [14].

3. *Процессы в пограничном слое атмосферы* описывались с использованием следующих схем параметризаций:

- а) схема Yonsei University (YSU) — нелокальная схема, учитывающая вовлечение и параболический профиль метеорологических величин в неустойчивом пограничном слое атмосферы [15];
- б) схема Mellor–Yamanda–Janjic (MYJ) — одномерная прогностическая схема, основанная на решении уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций, учитывающая перемешивание по вертикали [16];
- в) схема Asymmetric Convective Model (ACM2) — учитывает локальное и нелокальное перемешивание по вертикали [17].

Процессы в почве в экспериментах всегда описаны с использованием схемы Noah Land Surface Model, которая учитывает распространение влаги и тепла в почве в четырех подслоях, а также описывает эффекты от растительности, снежного покрова и физику мерзлого слоя почвы [18]. Для учета коротковолнового излучения использовались схема Dudhia [19], а длинноволнового — схема RTMM [20].

Рассматривалась только часть доступных схем параметризации, которые могут генерировать сотни комбинаций. Выбранные схемы, согласно проведенному обзору научной литературы, часто встречаются в исследованиях и оперативных прогнозах мировых центров погоды, а также, согласно проведенному анализу результатов предварительных численных экспериментов, лучше всего подходят для параметризации физических процессов в экваториальном регионе.

Были проведены численные эксперименты с различной комбинацией перечисленных схем параметризации физических процессов. Состав комбинаций схем параметризаций, используемый в численных экспериментах, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Конфигурация схем параметризаций в численных экспериментах

Схемы параметризации		
Микрофизики облаков	Конвективных процессов	Пограничного слоя атмосферы
Kessler (KS)	Kain Fritsch (KF)	Yonsei State University (YSU)
Purdue Lin (PL)	Betts-Miller-Janjic (BMJ)	Miller-Yamanda-Janjic (MYJ)
Purdue Lin (PL)	Grell-Devenyi (GD)	Asymmetric Convective Model (ACM2)
WRF Single Moment (WSM6)	Betts-Miller-Janjic (BMJ)	Yonsei State University (YSU)
Thompson (TH)	Grell-Devenyi (GD)	Miller-Yamanda-Janjic (MYJ)
Thompson (TH)	Ensemble Grell 3d (G3)	Asymmetric Convective Model (ACM2)

В связи с тем, что целью данной работы было получение прогноза температуры (максимальной и минимальной) и осадков, то и верификация модели проводилась по этим величинам. Прогнозы рассчитывались с заблаговременностью 72 ч ежедневно от 00 ч в период с 18 по 24 декабря 2011 г. Особое внимание уделено прогнозам

на 19 и 20 декабря, так как в этот период наблюдались осадки очень большой интенсивности, например, на станции Дар Эс Салаам 19.12.2011 интенсивность осадков составила 156 мм/сутки.

Анализируя процессы в экваториальном регионе в рассматриваемый период, было установлено, что увеличение интенсивности осадков связано с усилением центров действия атмосферы северного полушария (Азорский и Сибирский антициклоны, Аравийское гребень), которое вызвано смещением ВЗК на юг. В южном полушарии южно-атлантический антициклон (антициклон острова Святой Елены) был относительно сильным, а южноиндийский антициклон относительно слабым. В результате этих процессов уменьшилась температура поверхности воды над экваториальной центрально-восточной частью Тихого океана, в то время как температура поверхности воды восточной и центральной экваториальной части Индийского океана увеличивалась. Доминировали северо-восточные, северо-западные и западные ветры в прибрежных регионах, что привело к усилению конвергенции в приземном слое атмосферы, развитию конвекции и повсеместным очень сильным дождям.

Для оценки качества результаты модельного прогноза интерполировались в точки расположения метеорологических станций, координаты которых приведены в табл. 2.

*Таблица 2*

**Метеорологические станции, данные на которых используются  
для верификации результатов моделирования**

Название метеорологической станции	Координаты метеорологической станции	
	Широта	Долгота
Дар Эс Салаам	-6,87	39,20
Сонгеа	-10,68	35,58
Букоба	-2,5	32,9
Мбея	-8,9	33,4

По интерполированным прогностическим значениям и данным наблюдений, полученным из Танзанийского метеорологического агентства (ТМА), рассчитаны следующие ошибки: средняя ошибка прогноза (ME), среднеквадратическая ошибка (RMSE), средние систематические ошибки (MB). Перечисленные ошибки служили критерием для определения лучшей конфигурации модели. В данной статье представлены результаты оценки качества моделирования на внутренней мелкой (шаг 5 км) сетке.

Из-за сильной пространственно-временной изменчивости осадков на территории Танзании в численных экспериментах отдельно рассматривались 4 региона: северо-запад (станция Букоба), восточный (станция Дар Эс Салаам), южный (станция Сонгеа) и южное высокогорье (станция Мбея).

Анализ средней систематической ошибки прогнозов (табл. 3) позволяет говорить о том, что применение всех комбинаций параметризации на побережье Индийского океана (станция Дар Эс Салаам) в период с 18 по 24 декабря 2011 г. позволяет хорошо прогнозировать температуру, при этом не наблюдается ее систематического занижения

или завышения. Лучше всего прогнозируется средняя температура (относительная ошибка около 1 %), хуже всего — минимальная (около 14 %). Ошибки в прогнозе осадков небольшие: на станции Дар Эс Салаам варьируются от 1,3 до 3,6 мм/сутки.

Таблица 3

## Систематические ошибки прогноза при разных комбинациях схем параметризаций

Эксперт. идентификации	111	222	237	621	832	857
Максимальная температура, К						
Дар Эс Салаам	-0,46	-0,27	-0,27	-0,29	-0,89	-0,26
Сонгеа	-0,78	-0,52	-0,45	-0,39	-0,33	-0,24
Букоба	-0,3	-0,2	-0,01	0,1	0,3	0,4
Мбея	-0,6	-0,48	-0,36	-0,23	-0,11	0,01
Минимальная температура, К						
Дар Эс Салаам	0,12	0,04	0,11	0,12	0,14	0,2
Сонгеа	-0,18	-0,16	-0,06	0,01	0,11	0,2
Букоба	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7
Мбея	-0,19	-0,07	0,06	0,18	0,3	0,42
Средняя температура, К						
Дар Эс Салаам	-0,08	0,02	0,04	0,07	0,01	0,09
Сонгеа	-0,49	-0,41	-0,41	-0,35	-0,42	-0,42
Букоба	-0,12	-0,05	-0,06	-0,01	-0,02	-0,05
Мбея	-0,4	-0,3	-0,34	-0,28	-0,27	-0,29
Осадки, мм/сутки						
Дар Эс Салаам	1,3	2,1	2,7	3,6	2	1,8
Сонгеа	0,99	0,11	1,0	0,09	1,1	0,7
Букоба	0,6	0,3	0,4	0,6	0,5	0,4
Мбея	0,4	0,2	1,1	1	0,9	0,5

На территории Танзании экстремальными считаются осадки интенсивностью больше 50 мм/сутки. При оценке качества прогноза осадков самым важным является ответ на вопрос, правильно ли прогнозируется факт наличия или отсутствия осадков. На станции Дар Эс Салаам, где наблюдались осадки интенсивностью 156 мм/сутки, во всех численных экспериментах прогностическое количество осадков меньше 50 мм/сутки, при этом наибольшее значение получено при использовании комбинации PL-GD-ACM2 (35,8 мм/сутки). А когда на станции наблюдалось 58 мм/сутки, все комбинации прогнозировали больше 20 мм/сутки, при этом комбинация KS-KF-YSU (66,3 мм/сутки) завышала интенсивность осадков.

Комбинация параметризаций KS-KF-YSU позволяет дать самый лучший прогноз количества осадков с ошибкой 1,3 мм/сутки, а самая низкая точность — при использовании комбинации WSM6-KF-YSU (ошибка 3,6 мм/сутки). Экстремальное количество осадков спрогнозировать не удалось.

Из анализа экспериментов можно сделать вывод об основной роли схемы параметризации конвекции и о незначительном влиянии на качество прогноза осадков в этом регионе Танзании схемы параметризации пограничного слоя атмосферы и микрофизики облаков. Из анализа результатов прогнозов следует, что лучшей для прогноза осадков на побережье Индийского океана является комбинация KS-KF-YSU.

Аналогичным образом были проанализированы результаты численных экспериментов (табл. 3) для южного региона страны (станция Сонгеа). Во всех численных экспериментах занижается максимальная, а также минимальная (кроме комбинации WSM6-KF-YSU, TH-GD-MYJ и TH-G3-ACM2) и средняя температура. Ошибки в прогнозе осадков на станции Сонгеа небольшие и варьируются от 0,1 до 1,1 мм/сутки.

На этой станции в данном цикле исследований были случаи, когда осадков не было, но модель (комбинация KS-KF-YSU) спрогнозировала осадки интенсивностью до 20,8 мм/сутки, а при использовании комбинация PL-BMJ-MYJ прогнозировалось минимальная интенсивность осадков 0,1 мм/сутки.

Статистические оценки показывают нам, что комбинация параметризаций WSM6-KF-YSU позволяет дать самый лучший прогноз количества осадков с ошибкой 0,1 мм/сутки, а самая низкая точность наблюдается при использовании комбинации TH-BMJ-ACM2 с ошибкой 1,1 мм/сутки. В этом регионе, как и в первом, качество прогноза осадков в основном зависит от схемы параметризации конвекции.

Из анализа результатов прогнозов получено, что лучшей для прогноза осадков в южном регионе страны является комбинация WSM6-KF-YSU.

Анализ средней систематической ошибки (см. табл. 3) результатов прогнозов позволяет говорить о том, что при использовании всех комбинации параметризаций на северо-западе Танзании (станция Букоба) в период с 18 по 24 декабря 2011 г. температура воздуха прогнозируется хорошо, так как самая большая ошибка меньше 1К. Ошибки в прогнозе осадков на этой станции не велики и варьируются от 0,3 до 0,6 мм/сутки. На этой станции во всех численных экспериментах прогнозируемое и наблюдаемое количество осадков было меньше 50 мм/сутки.

Комбинация параметризаций PL-BMJ-MYJ позволяет дать самый лучший прогноз количества осадков с ошибкой 0,2 мм/сутки, а самая низкая точность при использовании комбинации PL-GD-ACM2 (ошибка 1,1 мм/сутки).

Из анализа результатов, приведенных в табл. 3, следует, что все комбинации параметризаций при моделировании на юге высокогорья региона (станция Мбея) в период с 18 по 24 декабря 2011 г. позволяют хорошо прогнозировать минимальную температуру воздуха (относительная ошибка около 6%), хуже всего прогнозируется максимальная (относительная ошибка 60%) температура. Но все поля температуры прогнозируются хорошо, так как самая большая ошибка меньше 1К. Ошибки в прогнозе осадков на станции Мбея небольшие и изменяются от 0,2 до 1,1 мм/сутки. Комбинация параметризаций PL-BMJ-MYJ позволяет дать самый лучший прогноз количества осадков с ошибкой 0,2 мм/сутки, а самая низкая точность — при использовании комбинации WSM6-BMJ-YSU (ошибка 1,0 мм/сутки).

Результаты проведенных экспериментов показывают, что осадки на территории республики Танзания распределяются неравномерно и возникают за счет разных физических механизмов. Локальные причины, такие как горы и озера, бассейн реки

Конго, а также крупномасштабные синоптические процессы (Южный Индийский антициклон и антициклон острова Святой Елены) являются причинами возникновения осадков на территории Танзании. Влияние этих процессов по-разному проявляется в различные сезоны года и в разных регионах. В данном цикле исследований на юге, южном высокогорье и северо-западе страны осадки были связаны с ВЗК. Этим объясняется тот факт, что для хорошего гидродинамического прогноза осадков на территории Танзании лучше использовать вложенные сетки и разные наборы параметризаций в разных регионах. В целом, по результатам экспериментов сделан вывод о том, что лучшей для прогноза осадков в первом регионе побережье Индийского океана является комбинация схемы физики — Kessler-Kain Fritsch-Yonse State University, в втором регионе (Сонгеа) — WRF Single Moment-Betts-Miller-Janjic-Yonse State University, в третьем (Букоба) и в четвертом (Мбея) — Purdue Lin-Betts-Miller-Janjic-Miller-Yamanda-Janjic. Преимущество схемы параметризации Kain Fritsch (KF) на побережье Индийского океана (станции Дар Эс Салаам) может быть связано с тем, что, как правило, она учитывает комплексы микрофизических параметров, благодаря чему возможно описание мезомасштабных процессов, восходящих потоков и осадкообразования лучше, чем в других схемах. Схема Betts-Miller-Janjic (BMJ) требует достаточного количества влаги и отсутствия выделения скрытого тепла на ранней стадии восходящих конвективных движений.

### Литература

1. *Ogallo L.J.* The Statistical Prediction of East African Rainfalls Using Quasi-Biennial Oscillation Phases Information // Kenya Journal of Science and Technology, 1982, A3, p. 43–54.
2. *Ntale H.E.* Prediction of East Africa Seasonal Rainfall Using Simplex Canonical Correlation Analysis // Journal of Climate, 2003, vol. 16, iss. 12, p. 2105–2112. — DOI:10.1175/1520-0442(2003)016<2105:POEASR>2.0.CO;2.
3. *WRF Source Codes* // WRF user [Electronic resource]: Boulder, Colorado, 2014. — URL: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html)
4. *Kondowe A.L.* Impact of Convective Parameterization Schemes on the Quality of Rainfall Forecast over Tanzania Using WRF-Model // Natural Science, 2014, vol. 6, iss. 10, p. 691–699. — DOI:10.4236/ns.2014.610069.
5. *Kondowe A.L., Aniskina O.G.* Impacts of Grid Spacing and Cumulus Schemes on the Quality of Rainfall Forecasts over Tanzania // The Way of Science, 2014, vol. 1, iss. 8, p. 222–229.
6. *National Centers for Atmospheric Research's (NCAR)* [Electronic resource] // CSIL Research Data Archive, 2014. — URL: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/?hash=access/>
7. *Kessler E.* On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation. Series: Meteorological monographs. — American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 1969. — 84 pp.
8. *Lin Y.-L., Farley R.D., Orville H.D.* Bulk parameterization of the snow field in a cloud model // Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, vol. 22, iss. 6, p. 1065–1092. — DOI:10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2.
9. *Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // Monthly Weather Review, 2004, vol. 132, iss. 2, p. 519–542. — DOI:10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2.
10. *Hong S.Y., Lim J.O.J.* The WRF Single-Moment Microphysics Scheme (WSM6) // Journal of the Korean Meteorological Society, 2006, vol. 42, p. 129–151.
11. *Kain J.S.* The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update // Journal of Applied Meteorology, 2004, vol. 43, iss. 1, p. 170–181. — DOI:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
12. *Betts A.K., Miller M.J.* The Betts-Miller Scheme. In: Emmanuel K.A. and Raymonds D.J. Eds. Representation of Cumulus Convection in Numerical. — American Meteorological Society, Boston, 1993. 246.

13. *Grell G.A., Devenyi D.* A Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques // *Geophysical Research Letters*, 2002, vol. 29, iss. 14, p. 38-1–38-4. — DOI:10.1029/2002GL015311.
14. *Grell G.A.* Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations // *Monthly Weather Review*, 1993, vol. 121, iss. 3, p. 764–787. — DOI:10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAU>2.0.CO;2.
15. *Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J.* A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes // *Monthly Weather Review*, 2006, vol. 134, iss. 8, p. 2318–2341. — DOI:10.1175/MWR3199.1.
16. *Janjić Z.I.* The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer and Turbulence Closure Schemes // *Monthly Weather Review*, 1994, vol. 122, iss. 5, p. 927–945. — DOI:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2.
17. *Pleim J.E.* A Combined Local and Non-Local Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, vol. 46, iss. 9, p. 1383–1395. — DOI:10.1175/JAM2539.1.
18. *Tewari M.F., Chen W., Wang J., Dudhia M.A., LeMone K., Mitchell M.E., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H.* Implementation and Verification of the Unified NOAA Land Surface Model in the WRF Model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting. 16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, 11–15. 2004.
19. *Dudhia J.* Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Meso-scale Two-Dimensional Model // *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, vol. 46, iss. 20, p. 3077–3104. — DOI:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.
20. *Mlawer E., Taubman S., Brown P., Iacono M., Clough S.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, vol. 102, iss. D14, p. 16663–16682. — DOI:10.1029/97JD00237.