



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская работа)

На тему «Адаптация гидродинамической модели WRF для Таиланда»

Исполнитель **Сингхапет Нутакирт, МАП-М19-1**
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель **кандидат физико-математических наук, доцент**
(ученая степень, ученое звание)
Ольга Георгиевна Анискина
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

кандидат физико-математических наук, доцент
Ольга Георгиевна Анискина
(фамилия, имя, отчество)

« 14 » июня 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Климат Таиланда.....	4
Глава 2. Использование модели WRF-ARW для прогноза осадков.....	12
Глава 3. Описание конфигурации WRF.....	44
Глава 4. Параметризации физических процессов.....	46
Глава 5. Оценка результатов прогноза.....	48
Заключение.....	59
Список использованных источников.....	60

Введение

Для повышения производительности и возможностей численного прогнозирования погоды тайским метеорологическим департаментом в королевстве Таиланд. Необходима разработка надежной модели, прогнозирующей осадки в течение 1 недели для улучшения качества жизни людей, а также деятельности государственных организаций, связанных с выпадением осадков. Целью данного исследования является адаптация мезомасштабной модели WRF-ARW к Королевству Таиланд, основные задачи которого заключались в следующем;

1. Изучить климатические характеристики осадков в Таиланде в сезон дождей.
2. Внедрить мезомасштабное численное прогнозирование погоды с использованием модели WRF для области в Таиланде.
3. Проверить качество прогнозирования осадков по фактическим данным, полученным с метеостанции в Таиланде.

Информация о климате Таиланда продемонстрирована в первой главе, например: местоположение, характеристики муссонов, сезоны, статистика температур и осадков, записанная тайским метеорологическим департаментом. Следующая глава состояла из реализаций модели WRF-ARW, которые объясняются на основе компиляции модели с операционной системой и установки параметров в файлах для работы с моделью, что дает результаты реализации модели. Обе главы 3 и 4 описывают конфигурации модели WRF и параметризацию над Бангкоком как область интереса. В результате в 5 главе были получены продукты WRF и статистическое сравнение модельных данных над Бангкоком с 4 метеорологическими станциями.

1 Климат Таиланда

Таиланд расположен в центре континентальной Юго-Восточной Азии между 5°37' северной широты и 20°27' северной широты и между 97°22 ' восточной долготы и 105°37' восточной долготы, граничит на севере с Мьянмой и Лаосом, на востоке с Лаосом и Камбоджей, в на юге - Сиамский залив и Малайзия, а на западе - Андаманское море и южная оконечность Мьянмы.

С точки зрения метеорологической классификации Таиланд можно разделить на 5 регионов;

1. Северный

Северный Таиланд - гористая местность, изрезанная крутыми речными долинами и возвышенностями, граничащими с центральной равниной, и стала источником нескольких важных рек. Эта часть разделена на 15 провинций: Чианг Рай, МаеХонг Сон, Чианг Май, Пхаяо, Лампхун, Лампанг, Пхре, Нан, Уттарадит, Пхитсанулок, Сукхотай, Так, Пхичит, КампхенгПхет и Пхетчабун.

2. Северо-восточный

Этот регион состоит в основном из сухого плато, которое в некоторых частях очень плоское, и нескольких невысоких, но крутых и каменистых холмов. Короткий сезон дождей приводит к сильным наводнениям в речных долинах. В отличие от более плодородных районов Таиланда, на северо-востоке страны длинный сухой сезон, и большая часть земель покрыта редкими травами. Эта часть разделена на 20 провинций: НонгКхай, Буэнг Кан, Лозэй, Удонтхани, НонгБуа Лам Фу, НакхонПханом, СаконНакхон, Мукдахан, КхонКаен, Каласин, Маха Саракхам, Рой Эт, Чайяпхум, Ясотхон, АмнатЧароен, Убонратчатхани, Шри Са Кет, Накхонратчасима, Бури Рам и Сурин.

3. Центральный

Эта часть представляет собой большую низкоуровневую равнину, где реки Пинг, Ван, Йом и Нан, берущие начало в северной части, сливаются вместе, образуя реку ЧаоПрайя в провинции Накхон Саван, которая является естественным автономным бассейном с культивируемыми рисовыми полями. Этот регион разделен на 18 провинций: Накхон Саван, Утай Тани, Чай Нат, Синг Бури, Лоп Бури, Анг Тонг, Сара Бури, Супхан Бури, Аюттхая, Патум Тани, Канчанабури, Ратчабури, Накхон Патом, Нонтхабури, Бангкок Метрополис, Самут. Пракан, СамутСакхон и СамутСонгкрам.

4. Восточный

Для региона характерны короткие горные хребты, чередующиеся с небольшими бассейнами коротких рек, впадающих в Сиамский залив. Эта часть разделена на 8 провинций: Накхоннайок, Прачинбури, Шри-Кео, ЧачоенгСао, Чонбури, Районг, Чантабури и Трат.

5. Южный

Эта часть представляет собой полуостров между Андаманским морем, которое находится на западной стороне части, и Южно-Китайским морем, которое находится на восточной стороне. Сюда же тянется длинный хребет западных гор в северной и центральной частях. Хребет Пхукет вдоль западного побережья и хребет Накхонситхаммарат в центральной или нижней части, образующий основу южной части, разделяют эту часть на два региона: Восточное побережье Южного Таиланда и Западное побережье Южного Таиланда. Десять провинций с севера на юг, а именно Пхетчабури, ПрачуапКири Хан, Чумпхон, Сурат Тани, Накхонситхаммарат, Пхаттхалунг, Сонгкхла, Паттани, Яла и Наратхиват, относятся к восточному побережью Южного Таиланда, в то время как есть 6 провинций, например Ранонг,

ПангНга, Краби. ,Пхукет, Транг и Сатун на западном побережье Южного Таиланда.

Климат Таиланда находится под влиянием сезонных сезонных дождей, то есть юго-западных и северо-восточных муссонов. Юго-западный муссон, который начинается в мае, приносит поток теплого влажного воздуха из Индийского океана в сторону Таиланда, вызывая обильные дожди по стране, особенно с наветренной стороны гор. Осадки в этот период вызваны не только юго-западным муссоном, но также и межтропической зоной конвергенции (ITCZ или МЗК) и тропическими циклонами, которые производят большое количество осадков. Май - период первого прихода МЗК в южную часть. Он быстро движется на север и проходит через южный Китай примерно с июня по начало июля, что является причиной засухи над верхним Таиландом. Затем МЗК перемещается в южном направлении и проходит над северной и северо-восточной частями Таиланда в августе, а затем над центральной и южной частями в сентябре и октябре, соответственно. Северо-восточный муссон, который начинается в октябре, приносит холодный и сухой воздух из антициклона в материковом Китае над большей частью Таиланда, особенно над северной и северо-восточной частями, которые находятся в более высоких широтах. В южной части этот муссон вызывает мягкую погоду и обильные дожди вдоль восточного побережья этой части. Наступление муссонов в некоторой степени варьируется. Юго-западный муссон обычно начинается в середине мая и заканчивается в середине октября, а северо-восточный муссон обычно начинается в середине октября и заканчивается в середине февраля.

С метеорологической точки зрения климат Таиланда можно разделить на три сезона следующим образом:

1. Сезон дождей или юго-западных муссонов (с середины мая до середины октября). Юго-западный муссон преобладает над Таиландом, и над страной идут обильные дожди. Самый влажный период в году - с августа по сентябрь.

Исключение составляет восточное побережье Южного Таиланда, где обильные дожди остаются до конца года, который является началом периода северо-восточного муссона, а ноябрь - самый влажный месяц.

2. Зимний или северо-восточный сезон муссонов (с середины октября до середины февраля). Это мягкий период года с довольно холодными в декабре и январе в верхней части Таиланда, но на восточном побережье Южного Таиланда выпадает большое количество осадков, особенно с октября по ноябрь.

3. Летний или предмуссонный сезон, с середины февраля до середины мая. Это переходный период от северо-восточных муссонов к юго-западным. Погода становится теплее, особенно в верхнем Таиланде. Апрель - самый жаркий месяц.

Верхний Таиланд, то есть северная, северо-восточная, центральная и восточная части, обычно переживает длительный период теплой погоды из-за его внутренней природы и зоны тропических широт. С марта по май, самый жаркий период года, максимальные температуры обычно достигают около 40 °C или более, за исключением прибрежных районов, где морской бриз смягчает дневные температуры. С наступлением сезона дождей также значительно снижаются температуры с середины мая, обычно они ниже 40 °C. Зимой выбросы холодного воздуха из Китая иногда снижают температуру до довольно низких значений, особенно в северной и северо-восточной частях, где температура может упасть почти до нуля или ниже нуля.

В южной части обычно умеренные температуры в течение всего года из-за морских особенностей этого региона. Высокие температуры, характерные для Верхнего Таиланда, встречаются редко. Суточные и сезонные колебания температур значительно меньше, чем в верхнем Таиланде.

Характерные значения температуры воздуха в Таиланде приведены в таблицах 1.1 – 1.3

Таблица 1.1 – Значения температуры воздуха в различных регионах ТаиландаЗа период 1981-2010 гг.

Сезонные температуры (°C) в различных частях Таиланда				
Температура	Регион	Зимний	Летний	Дождей
Среднее	Северный	23.4	28.1	27.3
	Северо-восточный	24.2	28.6	27.6
	Центральный	26.2	29.7	28.2
	Восточный	26.7	29.1	28.3
	Южный			
	-			
	Восточноепобережье	26.3	28.2	27.8
	- Западноепобережье	27.0	28.4	27.5
Средниймаксимум	Северный	31.1	36.1	32.4
	Северо-восточный	30.6	35.2	32.6
	Центральный	32.3	36.2	33.4
	Восточный	32.0	34.1	32.3
	Южный			
	-			
	Восточноепобережье	30.4	33.0	32.7
	- Западноепобережье	32.0	34.1	31.6
Среднийминимум	Северный	17.5	21.8	23.8
	Северо-восточный	18.7	23.2	24.4
	Центральный	21.2	24.6	24.8
	Восточный	22.3	25.2	25.2
	Южный			
	-			
	Восточноепобережье	22.8	24.1	24.4
	- Западноепобережье	23.2	24.0	24.3

Таблица 1.2 – Экстремальные максимальные значения температуры воздуха за период 1951-2015 гг.

Экстремальные максимальные температуры (°C) летом			
Регион	Максимальная температура	Дата / Месяц / Год	Провинция
Северный	44.5	27	Уттарадит
Северо-восточный	43.9	Апр 1960	Удонтхани
Центральный	43.5	28 Апр 1960	Канчанабури
Восточный	42.9	29 Апр 1958	Прачин Бури
Южный		14 Апр 1983	
-			
Восточное побережье	41.2	14,20 Апр 1992	Прачуап Кхири Хан
- Западное побережье	40.5	23 Апр 1990	Транг
		15 Апр 1998	
		29 Мар 1992	

Зимой в Верхнем Таиланде обычно бывает засушливая погода из-за северо-восточного муссона, который является основным фактором, влияющим на климат этого региона. Поздний период, лето, характеризуется постепенным увеличением количества осадков с грозами. Наступление юго-западного

муссона приводит к интенсивным дождям с середины мая до начала октября. Пик осадков приходится на август или сентябрь, некоторые районы, вероятно, будут затоплены. Тем не менее, периоды засухи обычно происходят в течение 1-2 недель или более в период с июня по начало июля из-за движения ITCZ на север в южный Китай.

Таблица 1.3 – Экстремальные минимальные значения температуры воздухаа период 1951-2015 гг.

Экстремальные минимальные температуры (°C) зимой			
Регион	Минимальнаятемпература	Дата / Месяц / Год	Провинция
Северный	0.8	27 Дек	Так
Северо-восточный	-1.4	1999	СаконНакхон
Центральный	5.2	2 Янв	Канчанабури
Восточный	7.6	1974	SraKaео
Южный		27 Дек	
-		1993	
Восточноепобережье	6.4	16 Янв	ПрачуапКхириХан
- Западноепобережье	13.7	1963	
		26 Дек	Ранонг
		1999	
		21 Янв	
		1956	

Сезон дождей в южной части отличается от верхнего Таиланда. Обильные дожди случаются как в периоды юго-западных, так и северо-восточных муссонов. Во время юго-западного муссона на западном побережье Южного Таиланда выпадает много осадков, пик которых приходится на сентябрь. Напротив, большое количество осадков на восточном побережье

Южного Таиланда, пик которого приходится на ноябрь, сохраняется до января следующего года, который является началом северо-восточного муссона.

Согласно общему годовому графику осадков, в большинстве районов страны выпадает 1200–1600 мм осадков в год. В некоторых областях на наветренной стороне, в частности в провинции Трат в Восточной части и провинции Ранонг на западном побережье Южного Таиланда, ежегодно бывает более 4500 мм. Годовое количество осадков менее 1200 мм выпадает в подветренных частях, которые хорошо видны в центральных долинах и в самой верхней части южной части.

Таблица 1.4 – количество осадков (мм) в различных частях Таиланда за период 1981-2010 гг.

Сезонное количество осадков (мм) в различных частях Таиланда				
Регион	Зимний	Летний	Дождей	Ежегодныедождливыедни
Северный	100.4	187.3	943.2	122
Северо-восточный	76.3	224.4	1,103.8	116
Центральный	127.3	205.4	942.5	116
Восточный	178.4	277.3	1,433.2	130
Южный				
-				
Восточноепобережье	827.9	229.0	680.0	145
- Западноепобережье	464.6	411.3	1,841.3	178

2 Использование модели WRF-ARW для прогноза осадков

2.1 Первый метод работы с моделью через программу Cygwin

В то время как проводился процесс компиляции по сайту https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/compilation_tutorial.php, некоторые команды были изменены из-за программы Cygwin на основе оболочки bash.

Условия были установлены перед запуском WRF как,

```
export DIR=/home/Singhaphet/Build_WRF/LIBRARIES
export CC=gcc
export CXX=g++
export FC=gfortran
export FCFLAGS=-m64
export F77=gfortran
export FFLAGS=-m64
export JASPERLIB=$DIR/grib2/lib
export JASPERINC=$DIR/grib2/include
export LDFLAGS=-L$DIR/grib2/lib
export CPPFLAGS=-I$DIR/grib2/include
export PATH=$DIR/netcdf/bin:$PATH
export NETCDF=$DIR/netcdf
export PATH=$DIR/mpich/bin:$PATH
export WRF_EM_CORE=1
export NETCDF_classic=1
```

Также компонент кода был добавлен в файл `configure.defaults`, который находится в подкаталоге основной папки WRF. Это необходимо для того, чтобы программа Cygwin работала с WRF.

```

#ARCH      CYGWIN_NT i686 x86_64, gfortran compiler with gcc #serial
smpardmpardm+sm
#
DESCRIPTION = GNU ($SFC/$SCC)
DMPARALLEL  = # 1
OMPCPP      = # -D_OPENMP
OMP         = # -fopenmp
OMPCC       = # -fopenmp
SFC         = gfortran
SCC         = gcc
CCOMP       = gcc
DM_FC       = mpif90 -f90=$(SFC)
DM_CC       = mpicc -cc=$(SCC)
FC          = CONFIGURE_FC
CC          = CONFIGURE_CC
LD          = $(FC)
RWORDSIZE   = CONFIGURE_RWORDSIZE
PROMOTION   = #-fdefault-real-8
ARCH_LOCAL  = -DNONSTANDARD_SYSTEM_SUBR -
DWRP_USE_CLM
CFLAGS_LOCAL = -w -O3 -c
LDFLAGS_LOCAL =
CPLUSPLUSLIB =
ESMF_LDFLAG = $(CPLUSPLUSLIB)
FCOPTIM     = -O2 -ftree-vectorize -funroll-loops
FCREDUCEDOPT = $(FCOPTIM)
FCNOOPT     = -O0
FCDEBUG     = # -g $(FCNOOPT) # -ggdb -fbacktrace
FORMAT_FIXED = -ffixed-form
FORMAT_FREE  = -ffree-form -ffree-line-length-none

```

```

FCSUFFIX      =
BYTESWAPIO    =    -fconvert=big-endian -frecord-marker=4
FCBASEOPTS_NO_G =    -w $(FORMAT_FREE) $(BYTESWAPIO)
FCBASEOPTS    =    $(FCBASEOPTS_NO_G) $(FCDEBUG)
MODULE_SRCH_FLAG =
TRADFLAG      =    -traditional
CPP           =    /lib/cpp -P
AR            =    ar
ARFLAGS       =    ru
M4            =    m4 -G
RANLIB        =    ranlib
RLFLAGS       =
CC_TOOLS      =    $(SCC)

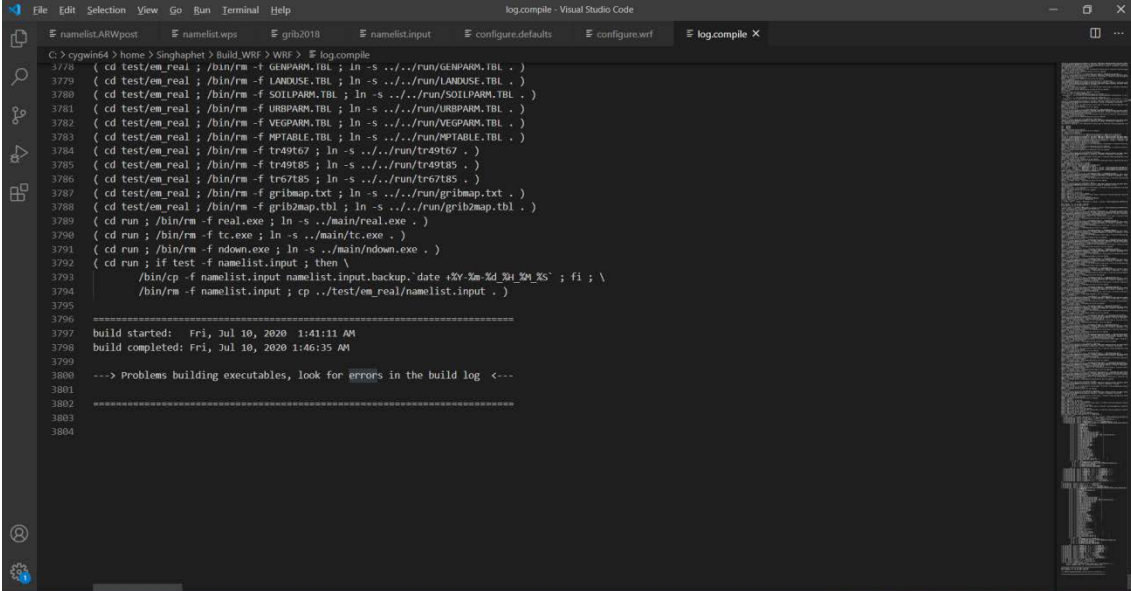
LIB_EXTERNAL  = \
                $(WRF_SRC_ROOT_DIR)/external/io_netcdf/libwrfio_nf.a
CONFIGURE_NETCDF_PATH/lib/libnetcdf.dll.a \
                -L CONFIGURE_NETCDF_PATH -lnetcdff -lnetcdf -lnetcdf -ltirpc
-lhdf5_hl -lhdf5 -lm -lz \
                $(WRF_SRC_ROOT_DIR)/external/io_grib2/libio_grib2.a
ESMF_IO_LIB                                     =
$(WRF_SRC_ROOT_DIR)/external/esmf_time_f90/libesmf_time.a
LIB_BUNDLED   = \
                $(WRF_SRC_ROOT_DIR)/external/fftpack/fftpack5/libfftpack.a \
                $(WRF_SRC_ROOT_DIR)/external/io_grib1/libio_grib1.a \
                $(WRF_SRC_ROOT_DIR)/external/io_grib2/libio_grib2.a \
                $(WRF_SRC_ROOT_DIR)/external/io_grib_share/libio_grib_share.a \
                $(WRF_SRC_ROOT_DIR)/external/io_int/libwrfio_int.a \
                $(ESMF_IO_LIB) \
                CONFIGURE_COMMS_LIB \

```

```
$(WRF_SRC_ROOT_DIR)/frame/module_internal_header_util.o \  
$(WRF_SRC_ROOT_DIR)/frame/pack_utils.o
```

```
#####
```

Кроме того, компиляция WRF не была успешной. Первый эксперимент был отменен из-за многочисленных ошибок и ограничения по времени. Результат представлен на рисунке 2.1.



```
C:\> cygwin64 > home > Singhapet > Build_WRF > WRF > % log.compile  
3776 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f GENPARM.TBL ; ln -s ../../run/GENPARM.TBL . )  
3779 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f LANDUSE.TBL ; ln -s ../../run/LANDUSE.TBL . )  
3780 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f SOILPARM.TBL ; ln -s ../../run/VEGPARM.TBL . )  
3781 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f URBPARM.TBL ; ln -s ../../run/VEGPARM.TBL . )  
3782 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f VEGPARM.TBL ; ln -s ../../run/VEGPARM.TBL . )  
3783 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f MPTABLE.TBL ; ln -s ../../run/MPTABLE.TBL . )  
3784 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f tr49t67 ; ln -s ../../run/tr49t67 . )  
3785 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f tr49t85 ; ln -s ../../run/tr49t85 . )  
3786 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f tr67t85 ; ln -s ../../run/tr67t85 . )  
3787 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f gribmap.txt ; ln -s ../../run/gribmap.txt . )  
3788 ( cd test/em_real ; /bin/rm -f grib2map.tbl ; ln -s ../../run/grib2map.tbl . )  
3789 ( cd run ; /bin/rm -f real.exe ; ln -s ../main/real.exe . )  
3790 ( cd run ; /bin/rm -f tc.exe ; ln -s ../main/tc.exe . )  
3791 ( cd run ; /bin/rm -f ndown.exe ; ln -s ../main/ndown.exe . )  
3792 ( cd run ; if test -f namelist.input ; then \  
3793     /bin/cp -f namelist.input namelist.input.backup.`date +%Y-%m-%d_%H_%M_%S` ; fi ; \  
3794     /bin/rm -f namelist.input ; cp ../test/em_real/namelist.input . )  
3795  
3796  
3797 build started:  Fri, Jul 10, 2020 1:41:11 AM  
3798 build completed: Fri, Jul 10, 2020 1:46:35 AM  
3799  
3800 ---> Problems building executables, look for errors in the build log <---  
3801  
3802  
3803  
3804
```

Рисунок 2.1 – Окно консоли при выводе ошибки с использованием Cygwin

2.2 Второй метод запуска модели через сервер РГГМУ

Начинается работа с моделью через программу WinSCP (рисунок 2.2).

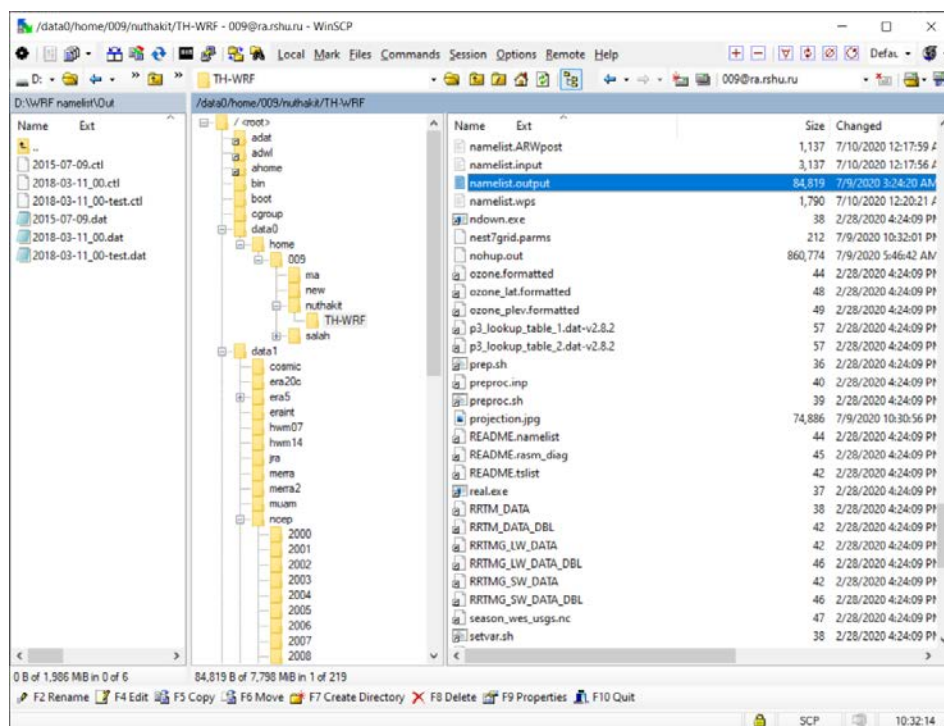


Рисунок 2.2 – Рабочее окно WinSCP

Перед первым запуском модели необходимо определить область интегрирования – прогноза. В данном исследовании была настроена область, охватывающая весь Таиланд.

Настройка области происходит через WRFdomainwizard, которая на сервере РГГМУ, вызывается через командурportal. На рисунке 2.3 представлена область выбранная для первоначальных численных экспериментов.

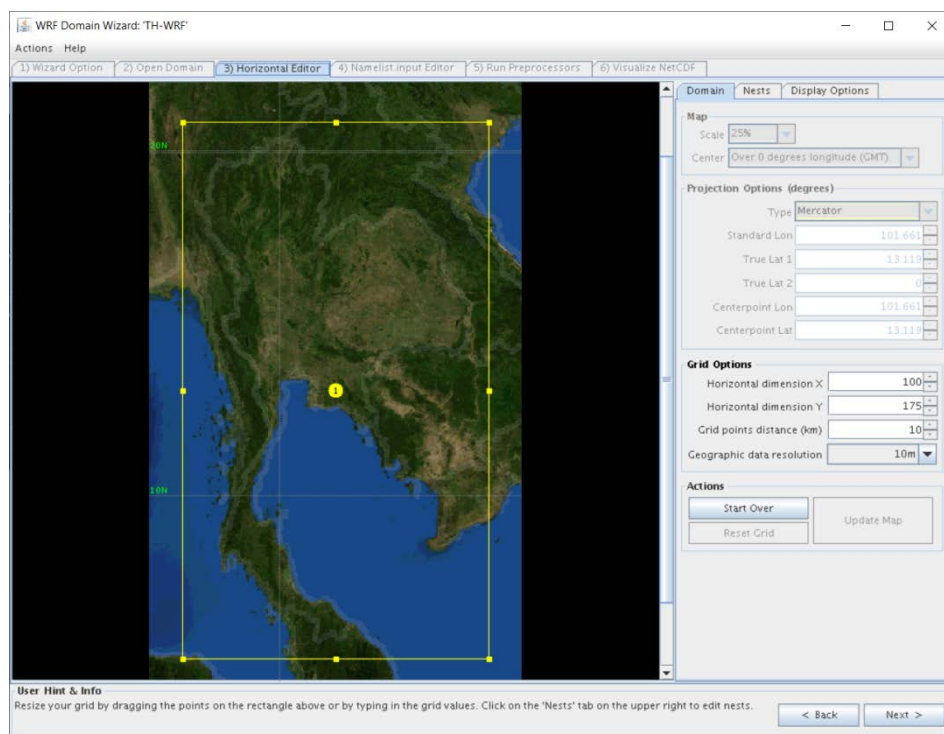


Рисунок 2.3 – Настройка области моделирования через WRFdomainwizard

На данном этапе исследований после завершения настройки домена с помощью мастера домена WRF параметры модели должны быть отредактированы в следующих файлах `namelist.input` и `namelist.wps`.

namelist.wps

1. `start_date` и `end_date` были изменены в соответствии с тем, что заблаговременность прогноза предполагается 7 суток. Эти параметры меняются при каждом запуске, если меняется начало прогноза. В данном исследовании даты определялись, например, от 00:00:00 11 марта 2018 года по 00:00:00 18 марта 2018 года.

2. `interval_seconds` определяет время обновления граничных условий. Этот интервал задаётся в секундах и определяется доступностью данных использованных для постановки граничных условий. В данном исследовании был определен как 21600 секунд, который обрабатывается как интервал 6 часов.

Терминал с установленными значениями параметров представлен на

рисунке 2.4

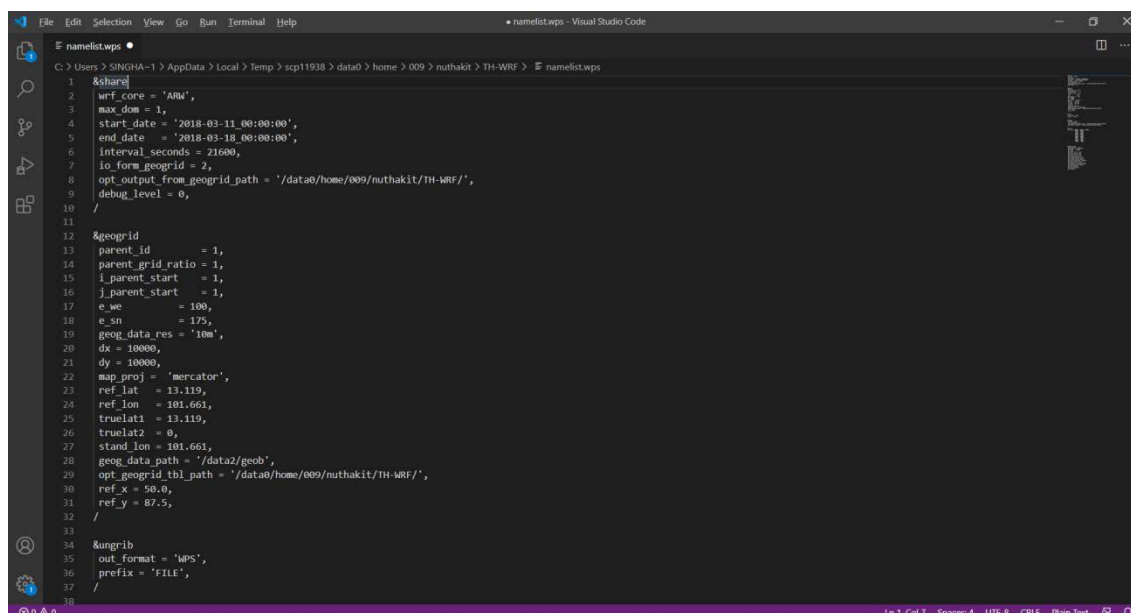


Рисунок 2.4 – Терминал с заданными параметрами namelist.wps

namelist.input

1. В разделе `&time_control` устанавливаются значения начала и конца прогноза. Данные должны быть аналогичны установленным в файле `namelist.wps` (рисунок 2.5).

2. Значение `num_metgrid_levels` в разделе `&domains` было связано с количеством уровней `metgrid`, которые находятся в файле `met_em` после выполнения команды `geogrid`, `ungrib` и `metgrid`. Количество уровней определяется наличием информации в файлах начальных данных и, к сожалению, не является постоянной величиной и может меняться от срока к сроку.

Начальные данные после выполнения процедуры `metgrid` помещаются в файл `met_em.dxx.yyyy-mm-dd_tt:tt:tt.nc`. Команда для предоставления информации о наличии данных в начальных полях (формат NetCDF) `met_em` используется как

`ncdump -hmet_em.dxx.yyyy-mm-dd_tt:tt:tt.nc>&log.ncdump` (где `xx` – номер домена, `yyyy` – год, `mm` – месяц, `dd` – день и `tt:tt:tt` – время).

Этот результирующий файл журнала для поиска количества уровней metgrid для определения в namelist.input.

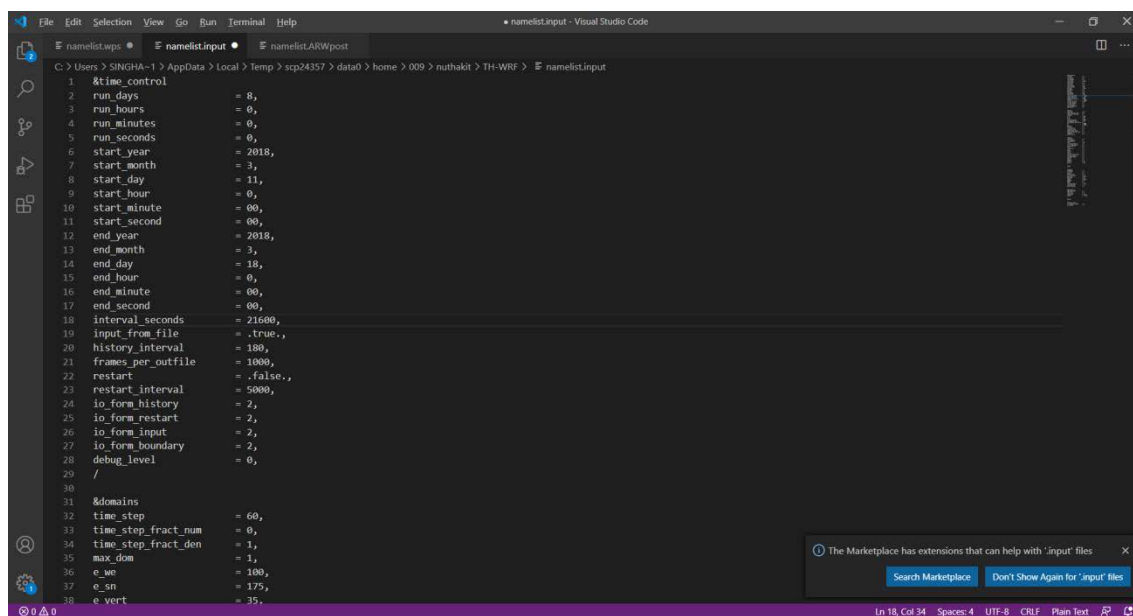


Рисунок 2.5 – Терминал с заданными параметрами файла namelist.input

Для запуска модели необходимо выполнить следующие команды

- ./geogrid.exe,
- ./ungrib.exe,
- ./metgrid.exe.

Каждая команда должна закончиться успешно, без ошибок.

В результате этих трёх комплексов препроцессинга модели WRF-ARW должны быть созданы файлы met_em . Их список для прогноза на 7 суток и с обновлением граничных условий каждые 6 часов представлен на рисунке 2.6.

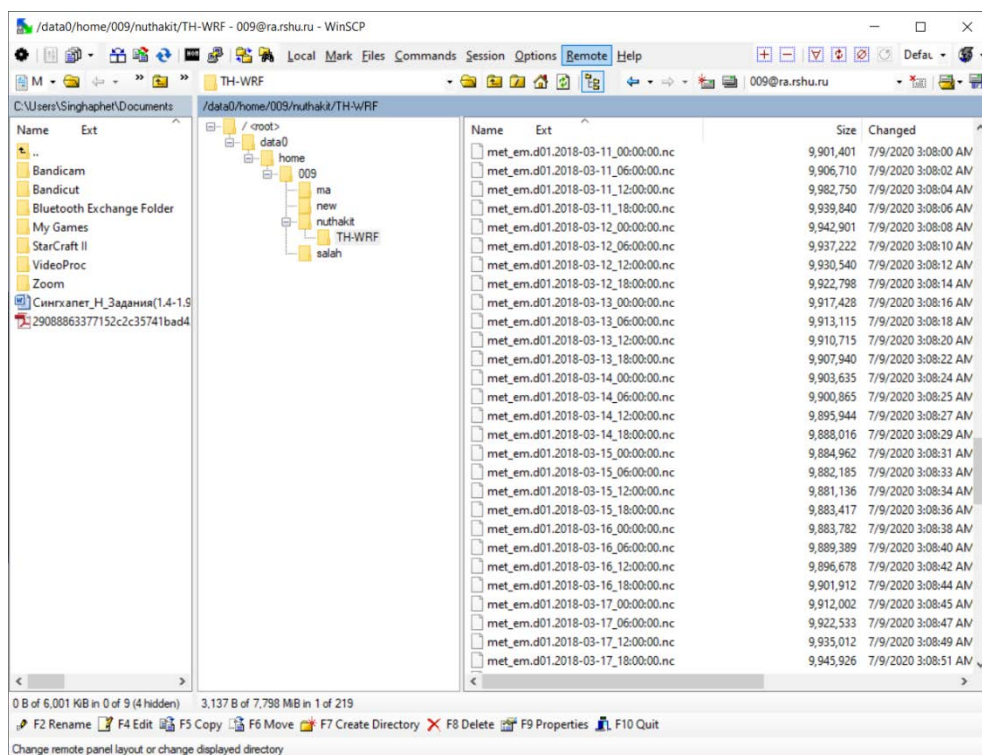


Рисунок 2.7 – Список файлов, которые должны быть созданы после выполнения команды metgrid

Заключительная команда препроцессинга - команда `./real.exe`. При выполнении этого этапа происходит контроль соответствия данных всех параметров во всех файлах, соответствие параметризаций всем имеющимся данным, согласованности параметризаций между собой. В результате выполнения этой команды создаются файлы `wrfbdy` и `wrfinput`, которые используются моделью при WRF-ARW при запуске.

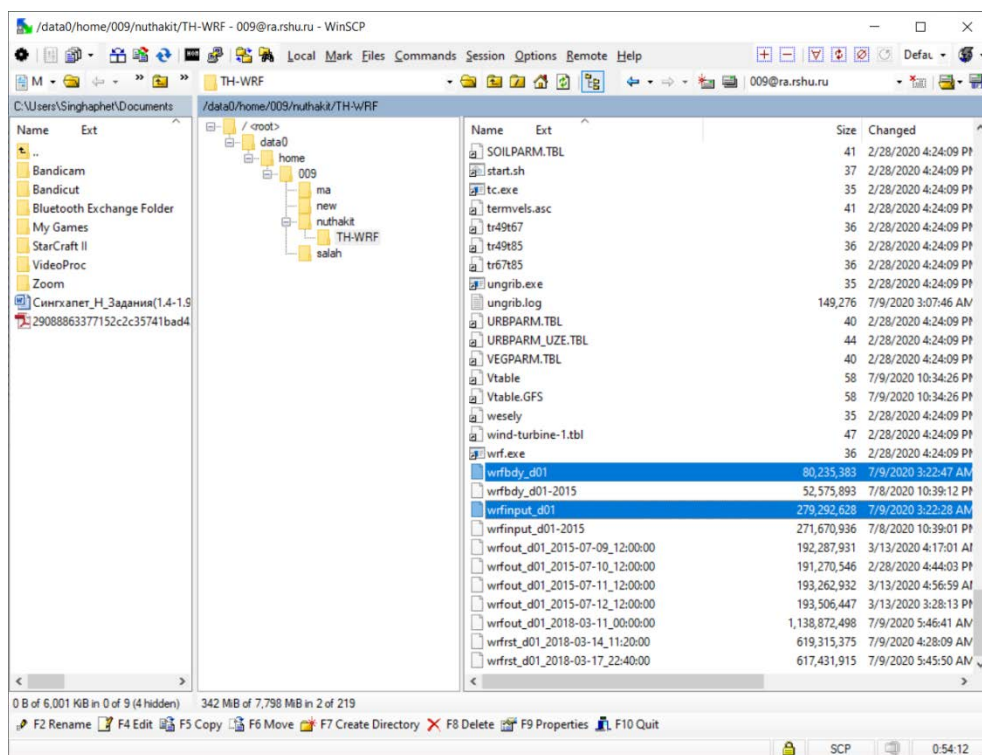


Рисунок 2.8 – Файлы созданные во время выполнения команды real.exe

Выходные (прогностические) данные модели записываются в файл с префиксом wrfout. На рисунке 2.9 показан пример этих файлов.

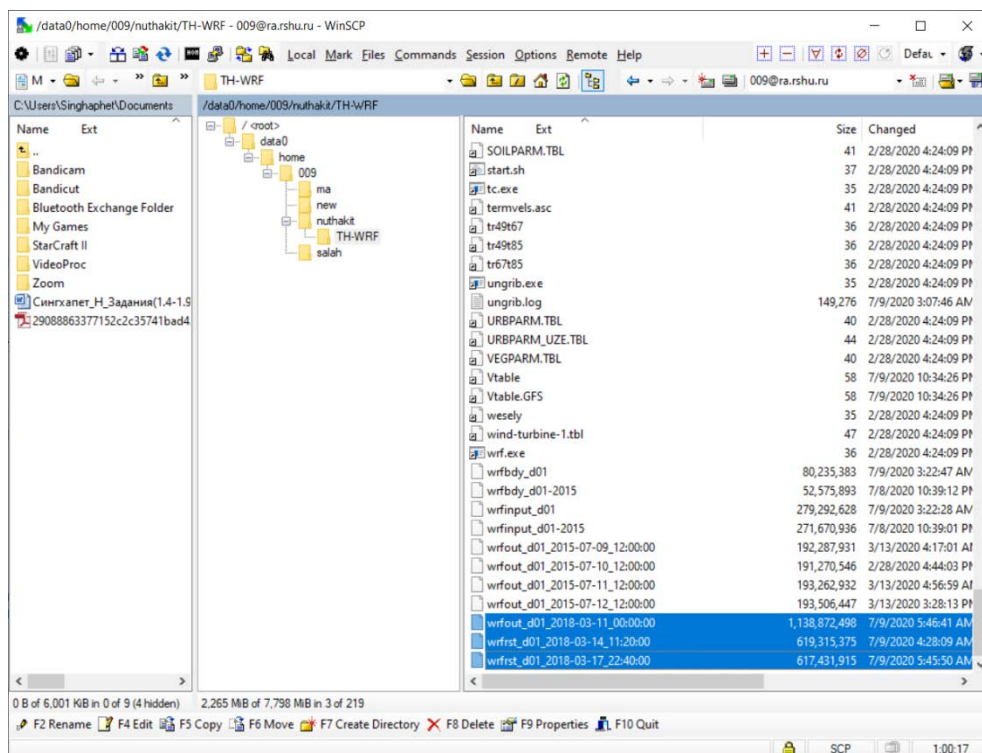


Рисунок 2.9 – Пример выходных файлов

Выбор формата, в котором будут сформированы выходные файлы, осуществляется в управляющем файле `namelist.input`.

Опция `io_form_history` позволяет выбрать

1 = `binaryformat` (нет доступного постпроцессинга)

2 = `netCDF`

4 = `PHDF5 format` (нет доступного постпроцессинга)

5 = `GRIB 1`

10 = `GRIB 2`

102 = `split netCDF files one per processor` (нет доступного постпроцессинга)

По умолчанию эта опция равно 2, то есть выходные файлы имеют формат `NetCDF`.

Первая запись каждого выходного файла это начальные поля.

Также в файле `namelist.input` определяется, как часто будут выводиться в файл результаты прогноза. За это отвечает опция `history_interval`. Интервал задаётся в минутах, по умолчанию равен 60 минут.

Очень важной является опция `frames_per_outfile`, которая определяет сколько моментов выходных данных выводится в один файл. По умолчанию эта опция равна 1. Это означает, что при прогнозе на 24 часа и выводе в файл прогностических значений каждый час будет создано 25 файлов, в каждом из которых будет прогностическая информация в один момент времени. Если бы эта опция в условиях данного примера была равна 25, то был бы создан один файл, в котором содержалась бы информация за все 24 прогностических моментов времени и начальная информация.

В файле `namelist.input` в блоке `&physics` определяются параметризации физических процессов, используемые при моделировании.

Стандартный постпроцессинг связан с программой `ARWpost.exe`. Управляющий файл этого этапа – `namelist.ARWpost`.

namelist.ARWpost

Параметры были установлены следующим образом.

1. В `&datetime` также были установлены значения в соответствии с параметрами в `namelist.wps`, `namelist.input`.

2. В разделе `&io, plot` был задан список для извлечения конкретных данных из файла WRF, которые указываются в `fields`, таких как `height`, `tc`, `tk`, `pressure`, `slp`, `andcape`.

Вид файла `namelist.ARWpost` представлен на рисунке 2.10.

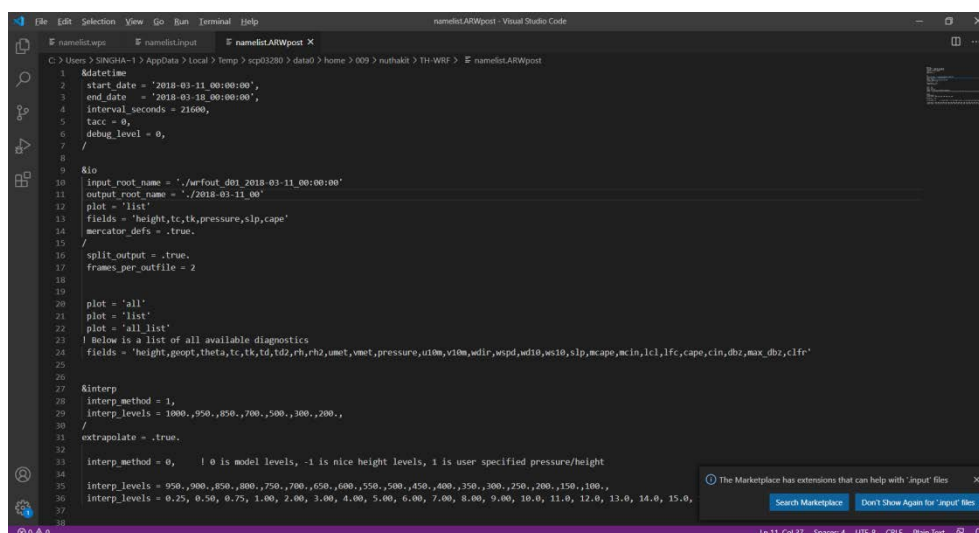


Рисунок 2.10 – Пример установки опций в файле namelist.ARWpost

Если после выполнения команды `./ARWpost.exe`, то выводится на консоль информация об ошибках, поскольку конкретные параметры не найдены. Результирующий формат файла `.ctl`, и `.dat` не сгенерирован (рисунки 2.11, 2.12).

```
009@ra:~/nuthakit/TH-WRF
./wrfout_d01_2018-03-11_00:00:00

START PROCESSING DATA

WARNING --- I do not recognize this data.
          OUTPUT FROM *          PROGRAM:WRF-Chem V4.0 MODEL
          Will make an attempt to read it.

Processing time --- 2018-03-11_00:00:00
Found the right date - continue

WARNING: The following requested fields could not be found
height
tc
tk
pressure
slp
cape

At line 147 of file process_domain_module.f (unit = 11, file = './2018-03-11_00.
dat')
Fortran runtime error: Cannot change STATUS parameter in OPEN statement
```

Рисунок 2.11 – Информация об ошибках работы программы ARWpost.exe

```
009@ra:~/nuthakit/TH-WRF

WARNING: The following requested fields could not be found
height
tc
tk
pressure
slp
cape

At line 147 of file process_domain_module.f (unit = 11, file = './2018-03-11_00.
dat')
Fortran runtime error: Cannot change STATUS parameter in OPEN statement

Backtrace for this error:
#0  0x00000030f44ac834 in wait () from /opt/grads/Linux/Versions/2.0.2.oga.2/x86
_64/libs/libc.so.6
#1  0x00002b6fea57700d in ?? () from /usr/lib64/libgfortran.so.3
#2  0x00002b6fea57882e in ?? () from /usr/lib64/libgfortran.so.3
#3  0x00002b6fea578a81 in _gfortran_generate_error () from /usr/lib64/libgfortra
n.so.3
#4  0x00002b6fea61cf32 in ?? () from /usr/lib64/libgfortran.so.3
#5  0x00002b6fea61de7e in _gfortran_st_open () from /usr/lib64/libgfortran.so.3
#6  0x00000000004138df in __process_domain_module_MOD_process_domain ()
#7  0x0000000000403408 in main ()
[009@ra TH-WRF]$
```

Рисунок 2.12 – Информация об ошибках работы программы ARWpost.exe

2.3 Третий метод обработки результатов моделирования через wrf-python

Сегодня мировое метеорологическое модельное сообщество очень широко использует для обработки результатов моделирования программные средства, разработанные на языке Python. Такая процедура имеется и на сервере РГГМУ.

В экспериментах вместо использования программы ARWpost использовался wrf-python.

Первое действие – необходимо определить, на каких изобарических поверхностях будут выводиться результаты прогнозов. Во-первых, файл pressure.txt был отредактирован для указания определенного уровня давления в наборе данных (рисунок 2.13 и 2.14).

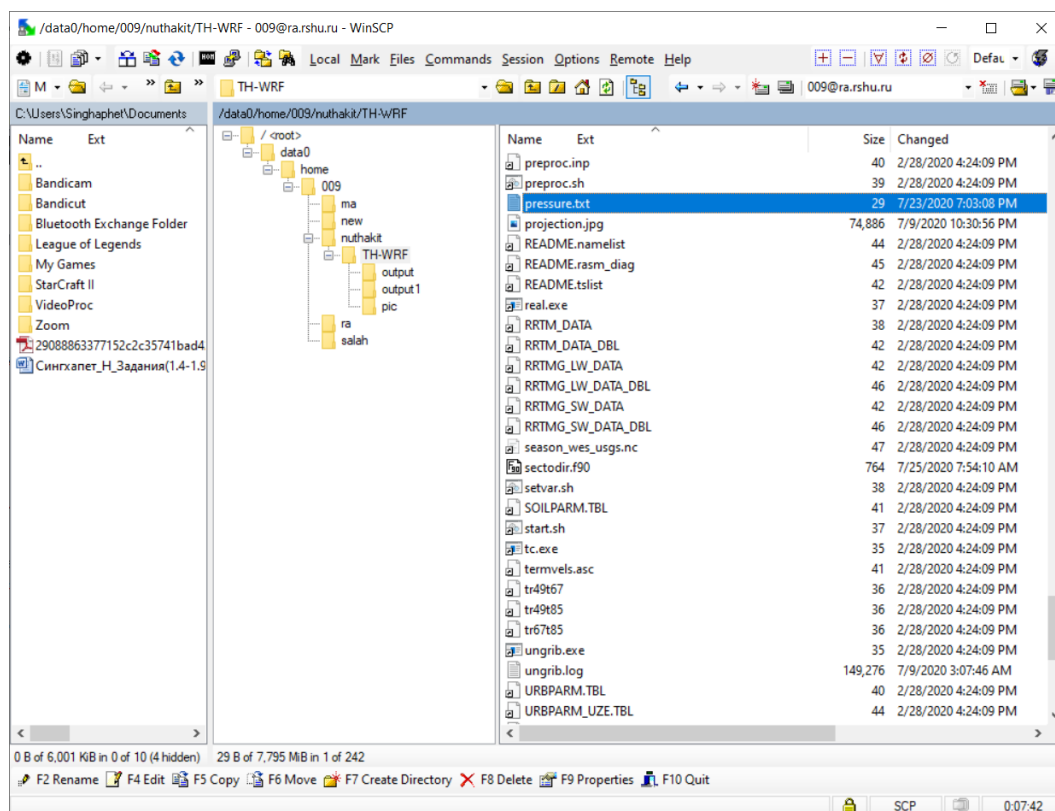


Рисунок 2.13 – Консоль с указанием файла для вывода результатов моделирования

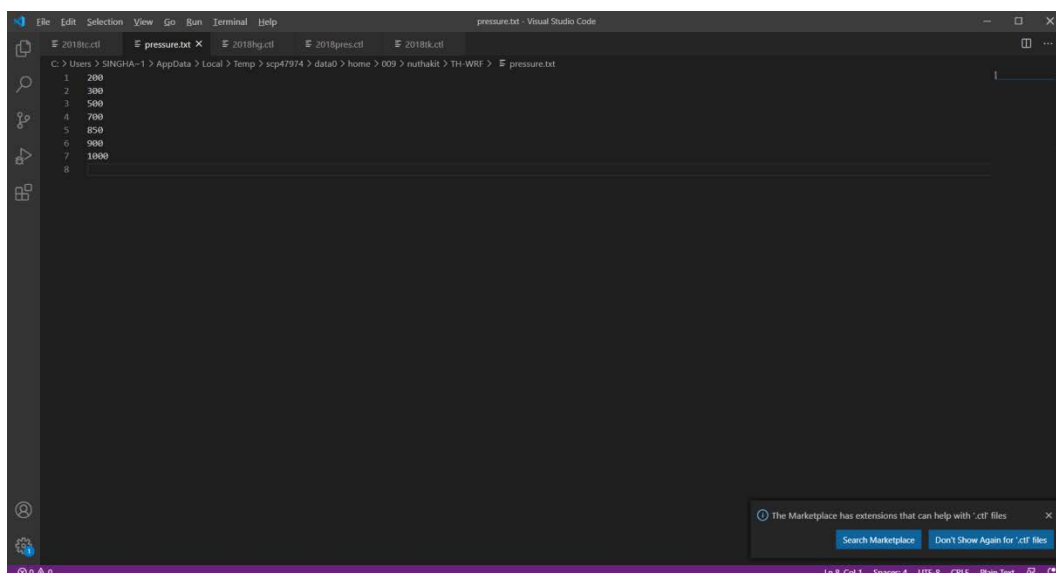


Рисунок 2.14 – Выбор изобарических поверхностей в файле pressure.txt

Далее запускается команда

arwruимя_файламоментов_времениимя_переменной

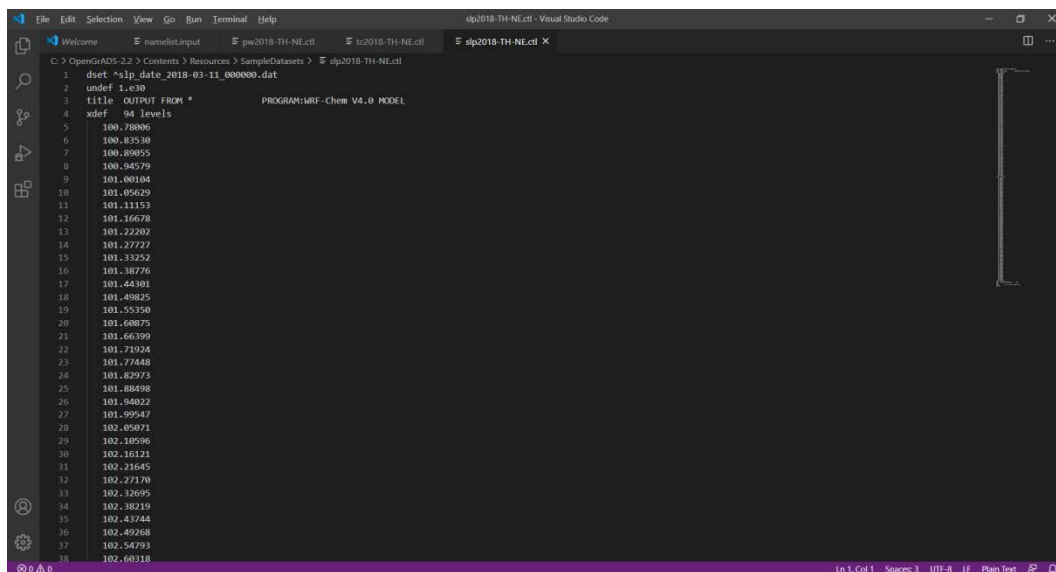
где аргументы, такие как

“моментов_времени” – может быть найден путем вычисления «общего дня прогноза», умножить на «часы (24)», а затем разделить на «history_interval» (рассчитать в единицах часов), расположенного в файле namelist.input.

“имя_переменной” – можете выбрать из списка, представленного на сайте <https://wrf-python.readthedocs.io/en/latest/diagnostics.html>.

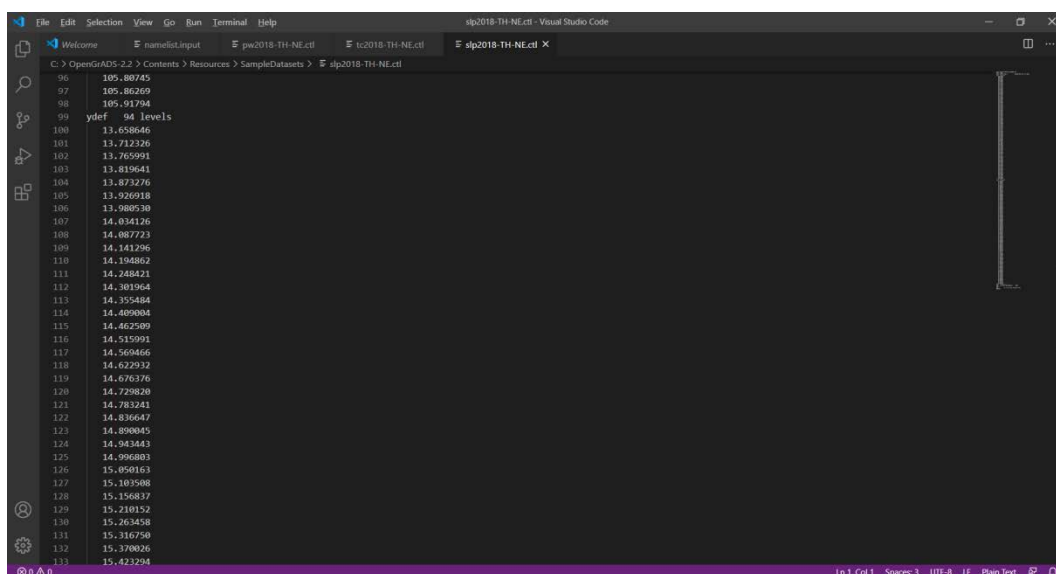
После выполнения команды файл набора данных и шаблон файла .ctl были созданы в выходной папке (рисунок 2.1 и 2.16).

Позже шаблон файла .ctl был отредактирован для определения конкретного прогноза с файлами набора данных (рисунки 2.17-2.21).



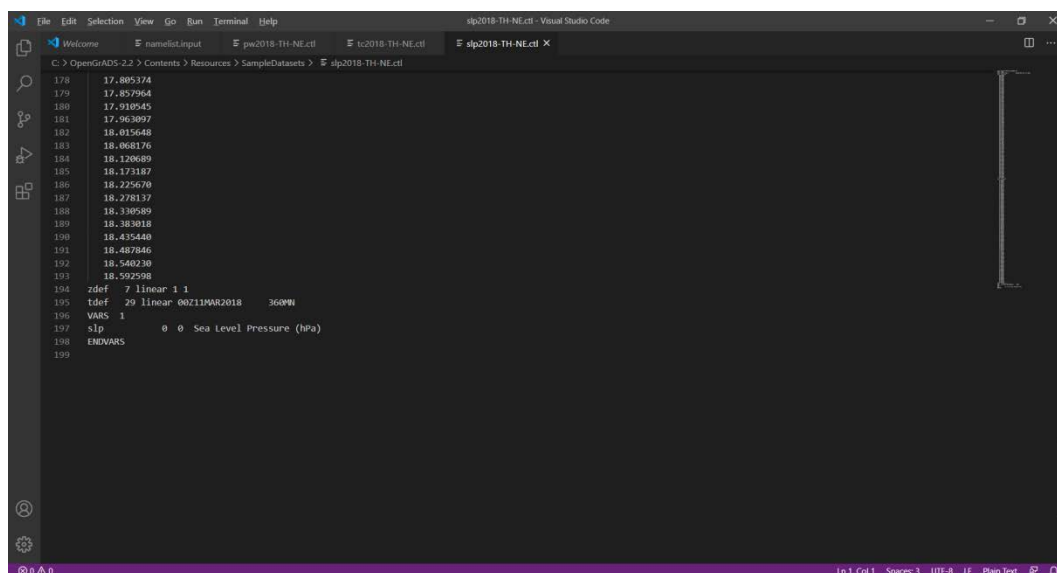
```
1 dset ^slp_date_2018-03-11_000000.dat
2 undef 1.e30
3 title OUTPUT FROM * PROGRAM:MRF-Chem V4.0 MODEL
4 xdef 94 levels
5 100.78006
6 100.83530
7 100.89055
8 100.94579
9 101.00104
10 101.05629
11 101.11153
12 101.16678
13 101.22202
14 101.27727
15 101.33252
16 101.38776
17 101.44301
18 101.49825
19 101.55350
20 101.60875
21 101.66399
22 101.71924
23 101.77448
24 101.82973
25 101.88498
26 101.94022
27 101.99547
28 102.05071
29 102.10596
30 102.16121
31 102.21645
32 102.27170
33 102.32695
34 102.38219
35 102.43744
36 102.49268
37 102.54793
38 102.60318
```

Рисунок 2.17 – Часть файла .ctl



```
96 105.80745
97 105.86269
98 105.91794
99 ydef 94 levels
100 13.658846
101 13.712326
102 13.765991
103 13.819641
104 13.873276
105 13.926918
106 13.980530
107 14.034126
108 14.087723
109 14.141296
110 14.194862
111 14.248421
112 14.301964
113 14.355484
114 14.409004
115 14.462550
116 14.515991
117 14.569466
118 14.622932
119 14.676376
120 14.729820
121 14.783241
122 14.836647
123 14.890045
124 14.943443
125 14.996803
126 15.050163
127 15.103508
128 15.156837
129 15.210152
130 15.263458
131 15.316750
132 15.370026
133 15.423294
```

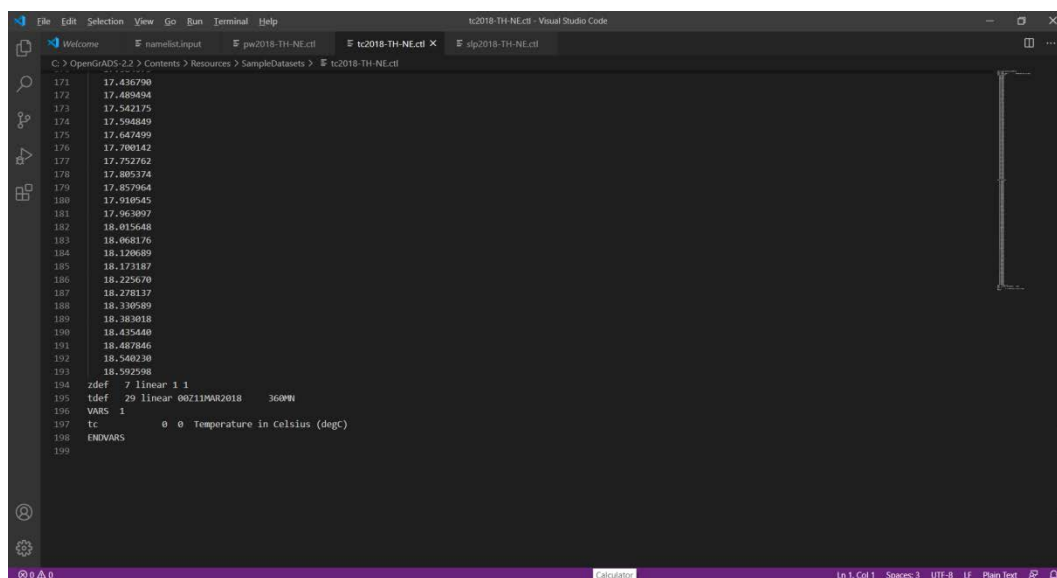
Рисунок 2.18 – Часть файла .ctl



The screenshot shows a Visual Studio Code editor window with the file 'slp2018-TH-NE.ctl' open. The file contains a list of numerical values for sea level pressure (slp) in hPa, ranging from 17.885374 to 18.592598. The data is organized into a table with columns for latitude (lat), longitude (lon), and time (time). The file is saved in UTF-8 encoding.

```
178 17.885374
179 17.857964
180 17.910545
181 17.963097
182 18.015648
183 18.068176
184 18.120689
185 18.173187
186 18.225670
187 18.278137
188 18.330589
189 18.383018
190 18.435440
191 18.487846
192 18.540230
193 18.592598
194 zdef 7 linear 1 1
195 tdef 29 linear 00Z11MAR2018 360000
196 VARS 1
197 slp 0 0 Sea Level Pressure (hPa)
198 ENDOF
199
```

Рисунок 2.19 – Часть файла .ctl



The screenshot shows a Visual Studio Code editor window with the file 'tc2018-TH-NE.ctl' open. The file contains a list of numerical values for temperature (tc) in Celsius, ranging from 17.436790 to 18.592598. The data is organized into a table with columns for latitude (lat), longitude (lon), and time (time). The file is saved in UTF-8 encoding.

```
171 17.436790
172 17.489494
173 17.542175
174 17.594849
175 17.647499
176 17.700142
177 17.752762
178 17.805374
179 17.857964
180 17.910545
181 17.963097
182 18.015648
183 18.068176
184 18.120689
185 18.173187
186 18.225670
187 18.278137
188 18.330589
189 18.383018
190 18.435440
191 18.487846
192 18.540230
193 18.592598
194 zdef 7 linear 1 1
195 tdef 29 linear 00Z11MAR2018 360000
196 VARS 1
197 tc 0 0 Temperature in Celsius (degC)
198 ENDOF
199
```

Рисунок 2.20 – Часть файла .ctl

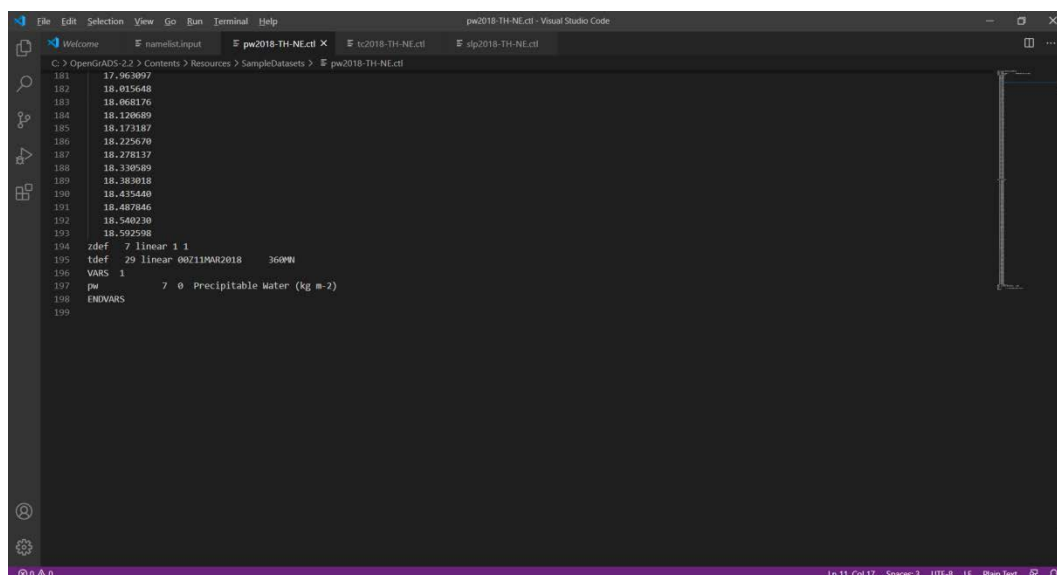


Рисунок 2.21 – Часть файла .ctl

2.4 Анализ результатов численных экспериментов

Процедура анализа результатов с использованием файлов .ctl для отображения прогностических полей производилась с помощью программы GrADS.

Период анализа был выбран с 11 марта 2018 года по 17 марта 2018 года во время 06Z, чтобы предсказать вероятность ливней над северо-восточным регионом Таиланда вечером (12Z) в жаркое время года.

Поля

давления на уровне моря в гПа (slp) и температуры в градусах Цельсия (tc) будут проанализированы в 06Z,

осаждаемая вода (pw) в 12Z для сравнения и прогноза в течение периода.

Результаты прогнозов представлены на рисунках 2.22 – 2.42

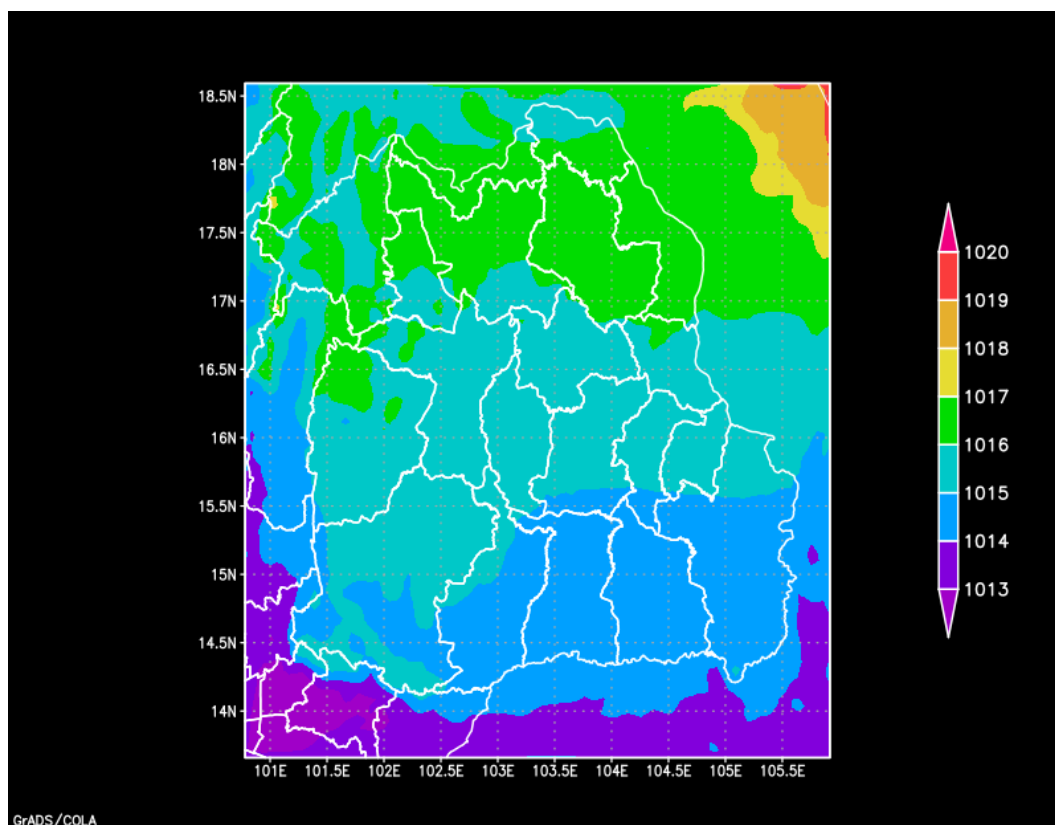


Рисунок 2.22 – Поле давления, приведённого к уровню моря в 11.03.2018 06Z

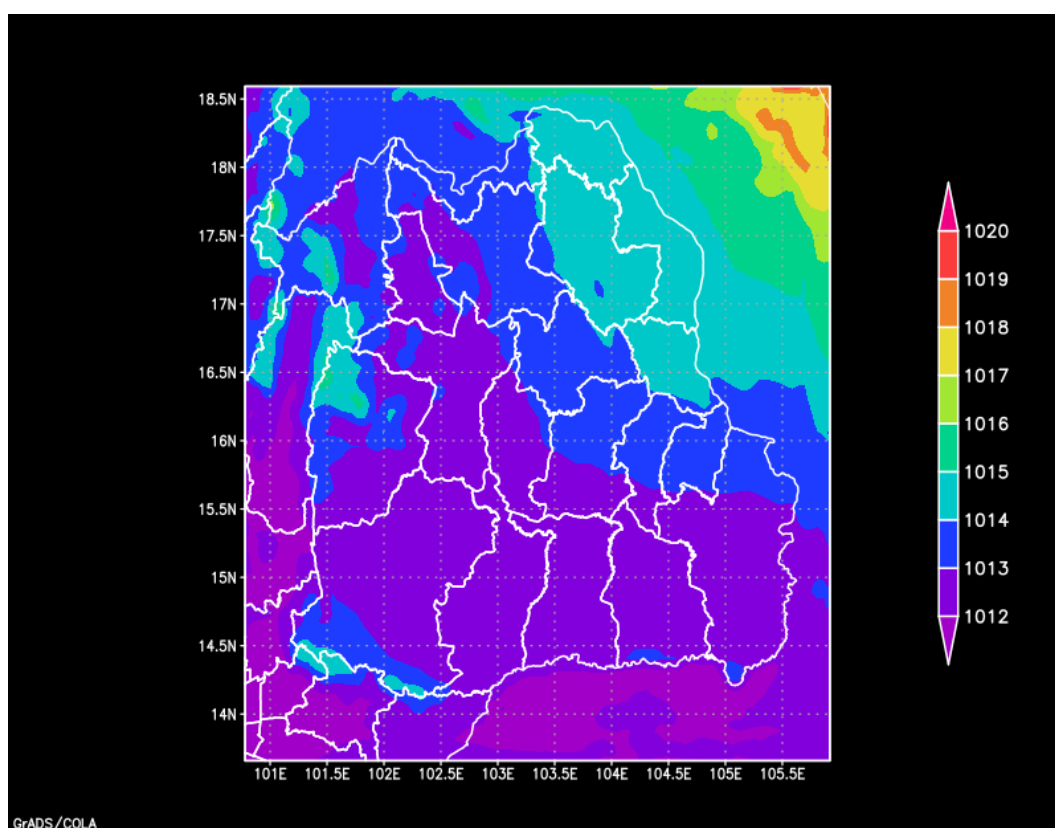


Рисунок 2.23 – Поле давления, приведённого к уровню моря в 12.03.2018 06Z

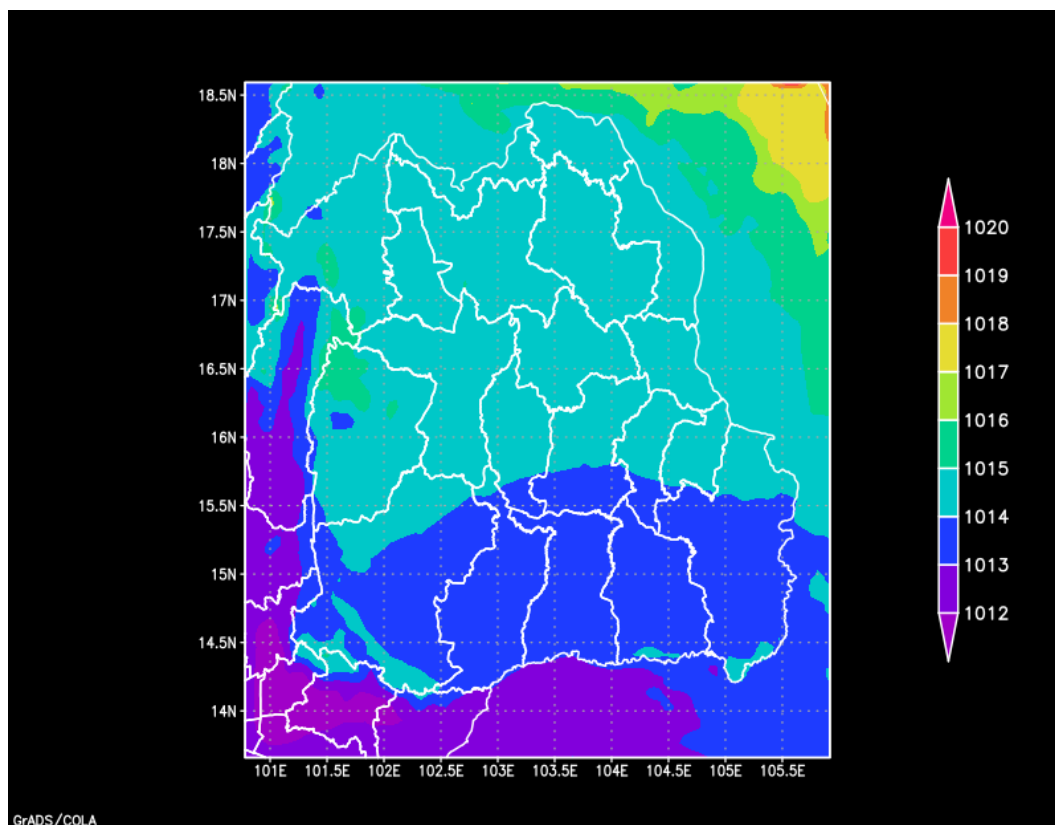


Рисунок 2.24 – Поле давления, приведённого к уровню моря в 13.03.2018 06Z

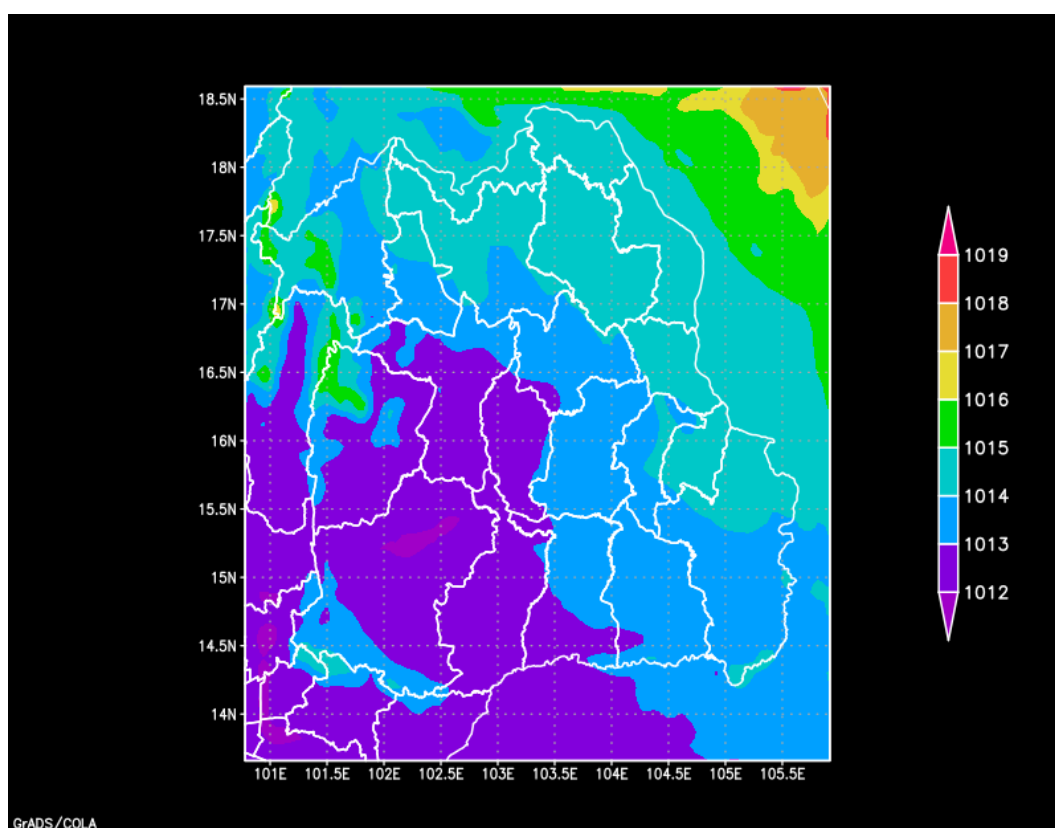


Рисунок 2.25 – Поле давления, приведённого к уровню моря в 14.03.2018 06Z

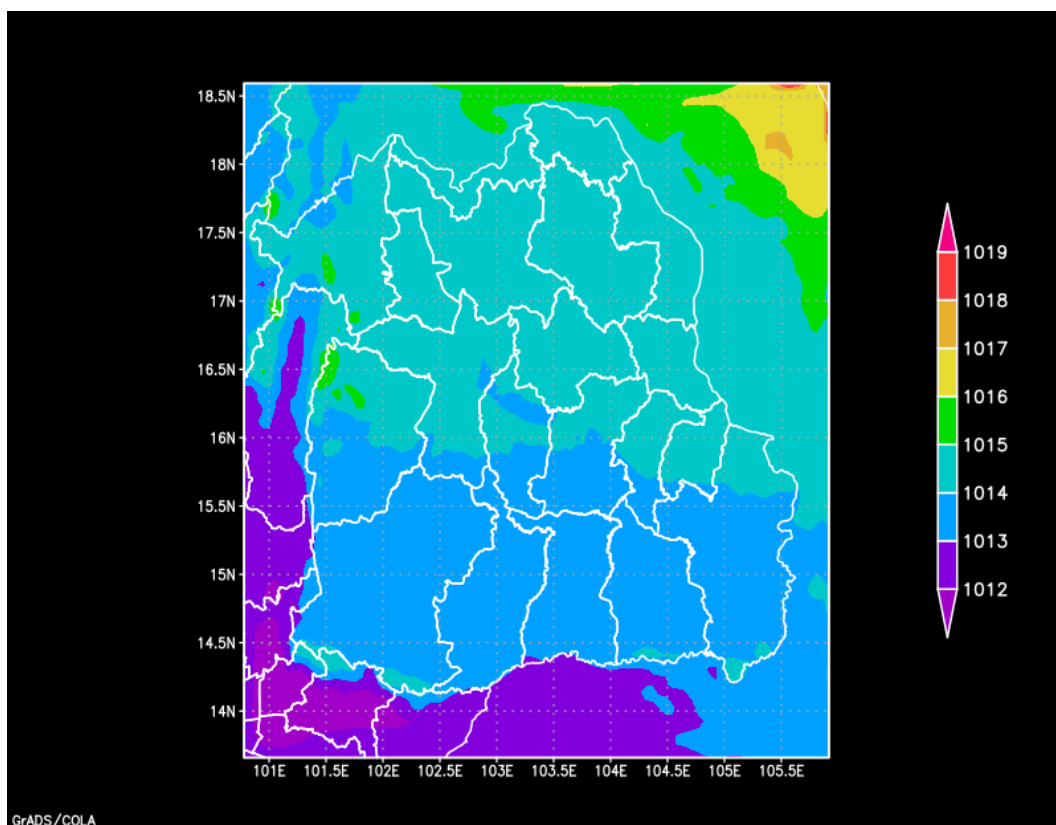


Рисунок 2.26 – Поле давления, приведённого к уровню моря в 15.03.2018 06Z

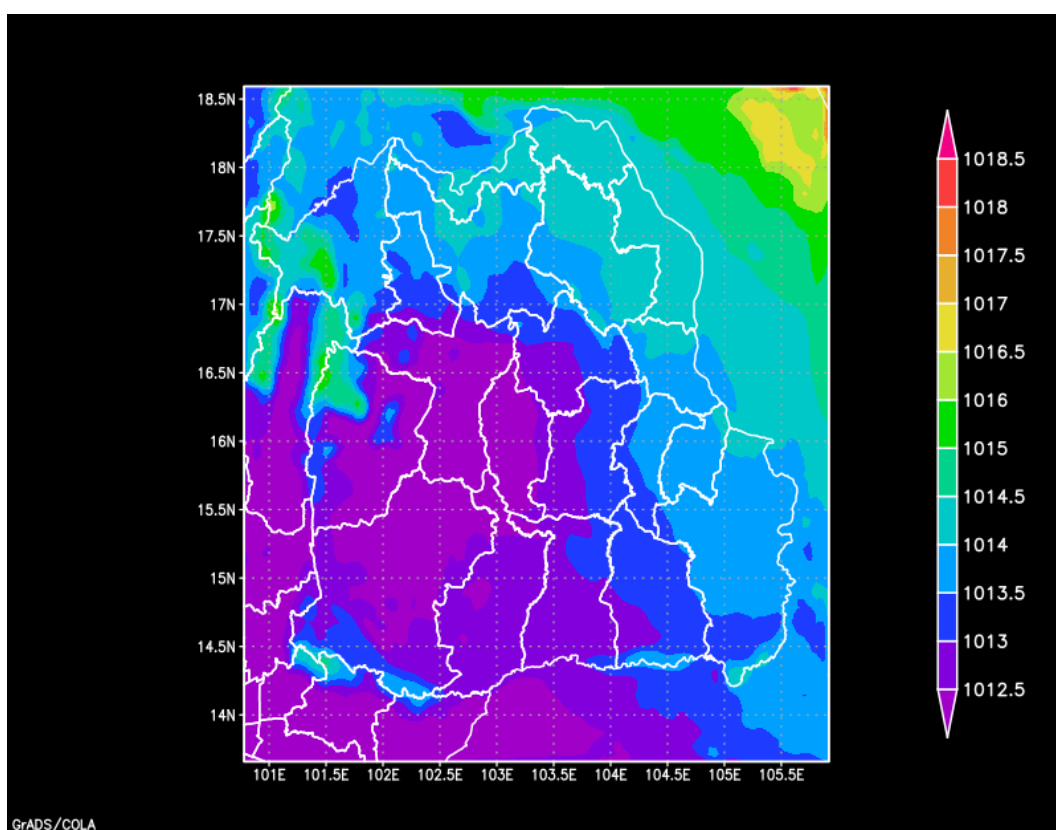


Рисунок 2.27 – Поле давления, приведённого к уровню моря в 16.03.2018 06Z

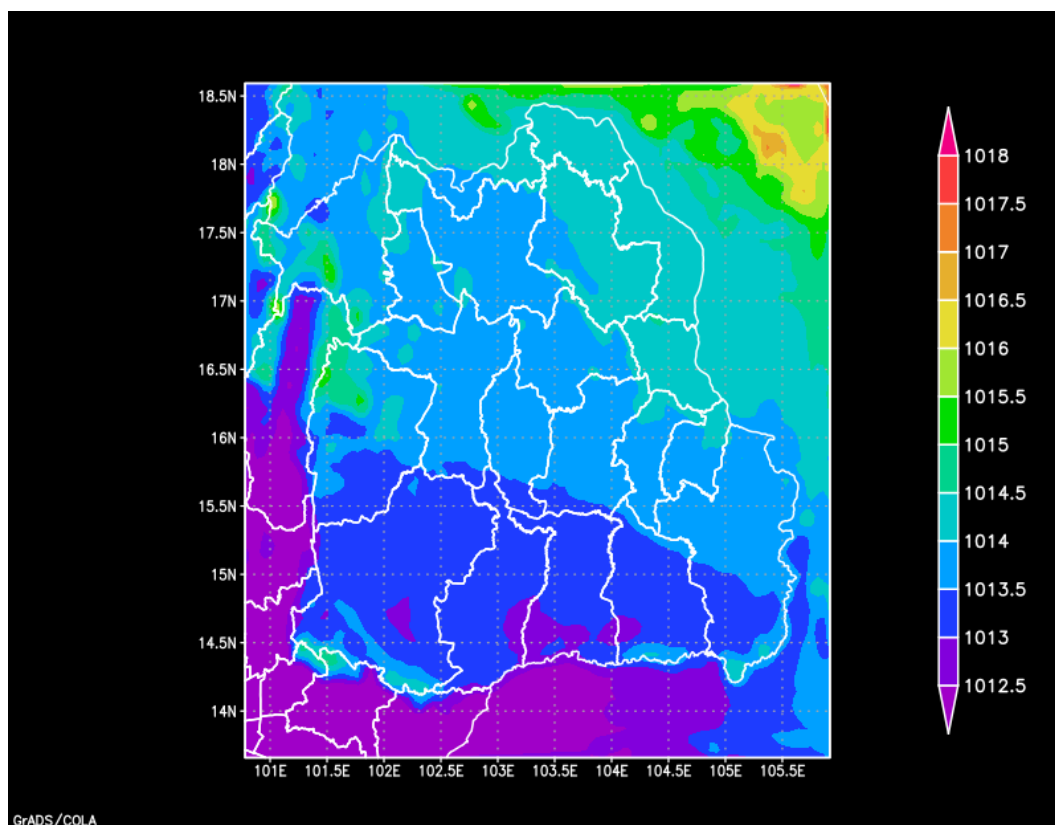


Рисунок 2.28 - Поле давления, приведённого к уровню моря в 17.03.2018 06Z

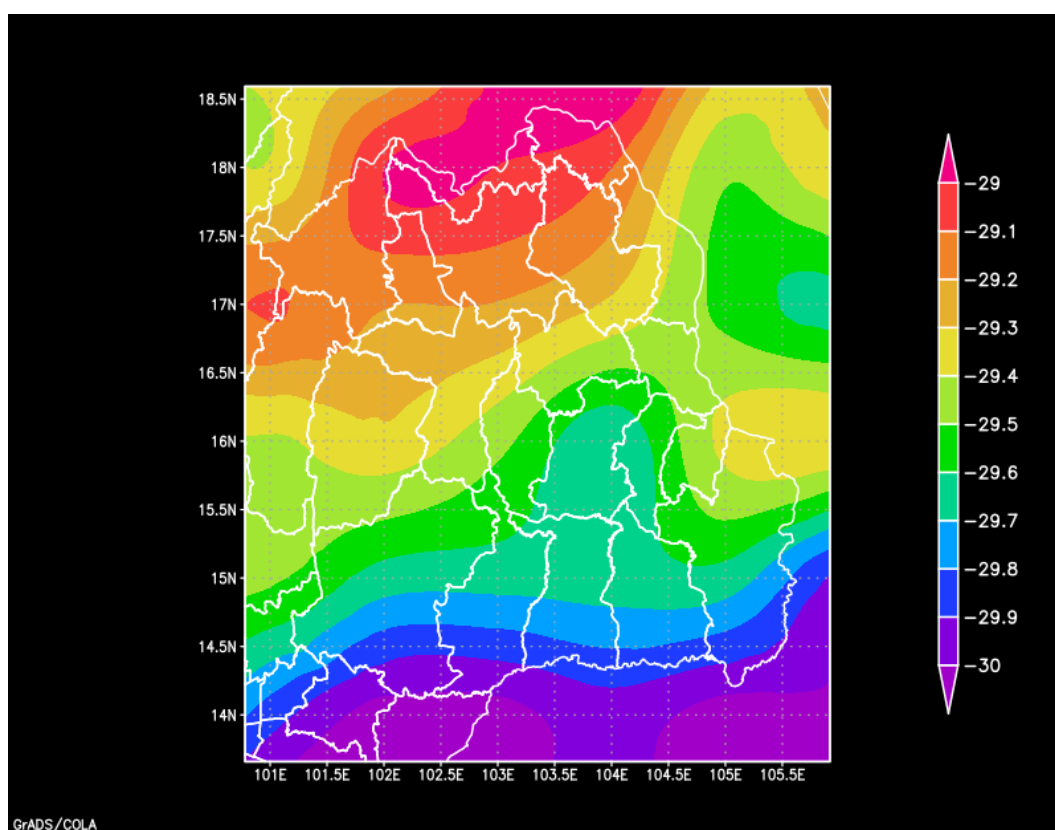


Рисунок 2.29 – Поле температуры воздуха в 11.03.2018 06Z

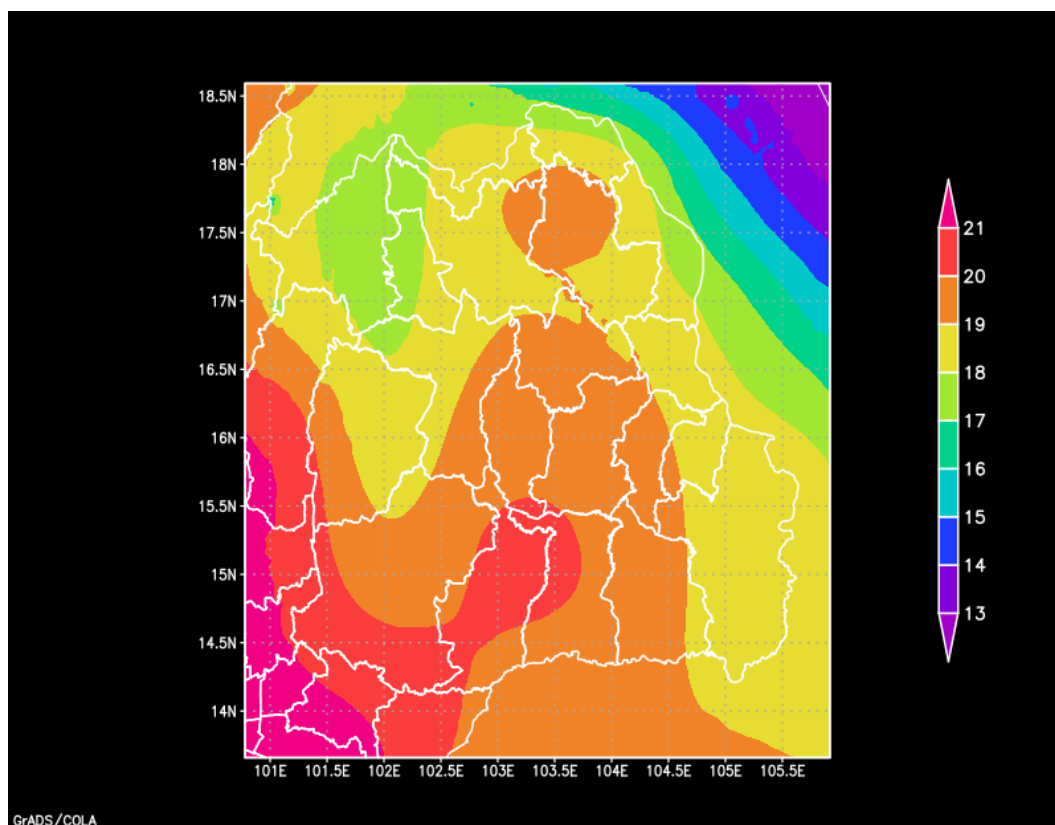


Рисунок 2.30 – Tc в 12.03.2018 06Z

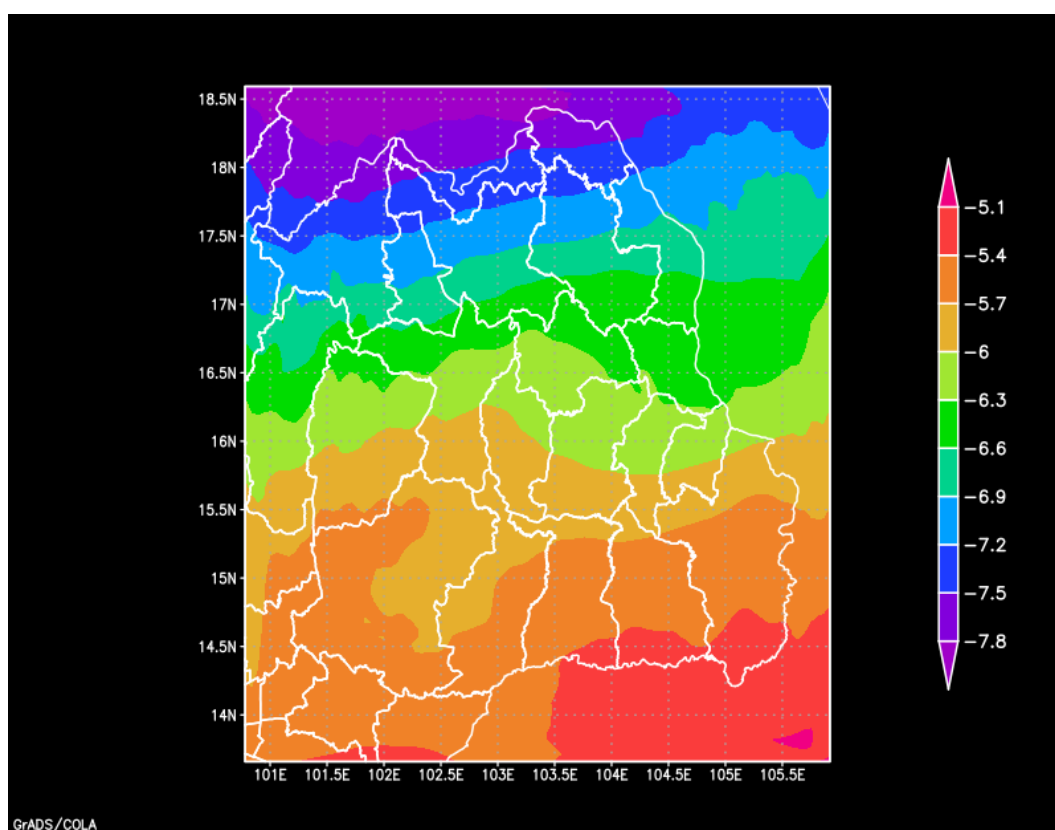


Рисунок 2.31 – Поле температуры воздуха в 13.03.2018 06Z

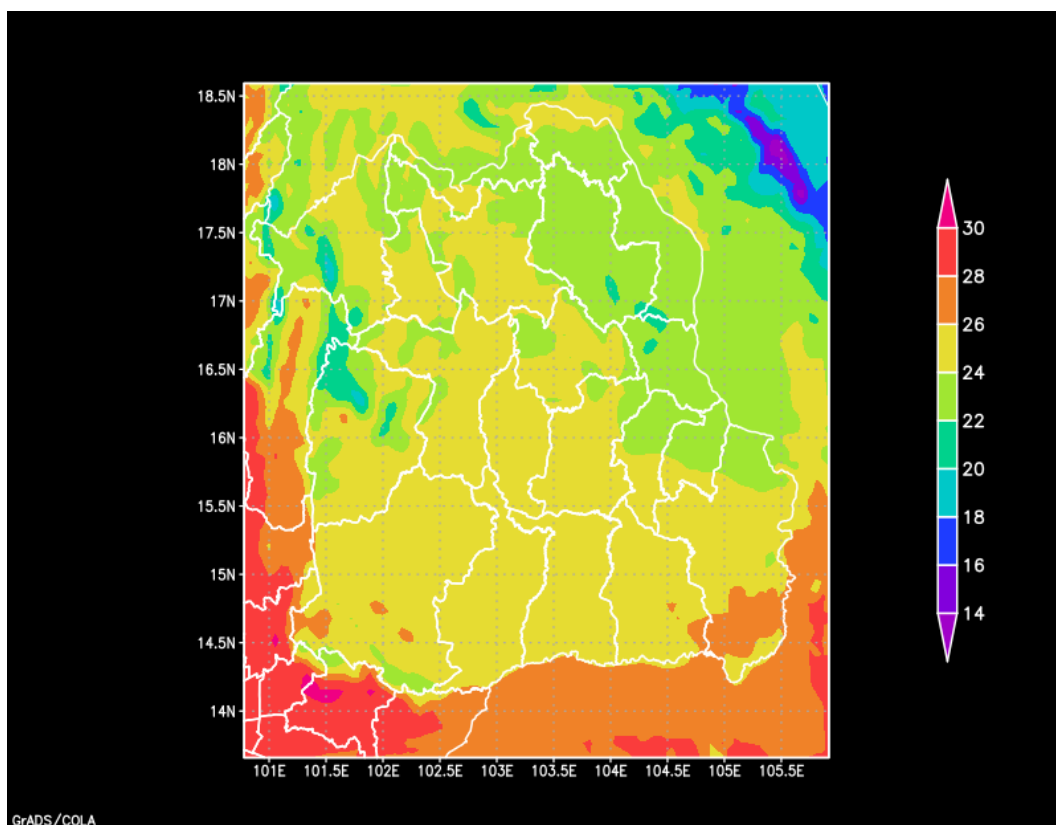


Рисунок 2.32 – Поле температуры воздуха в 14.03.2018 06Z

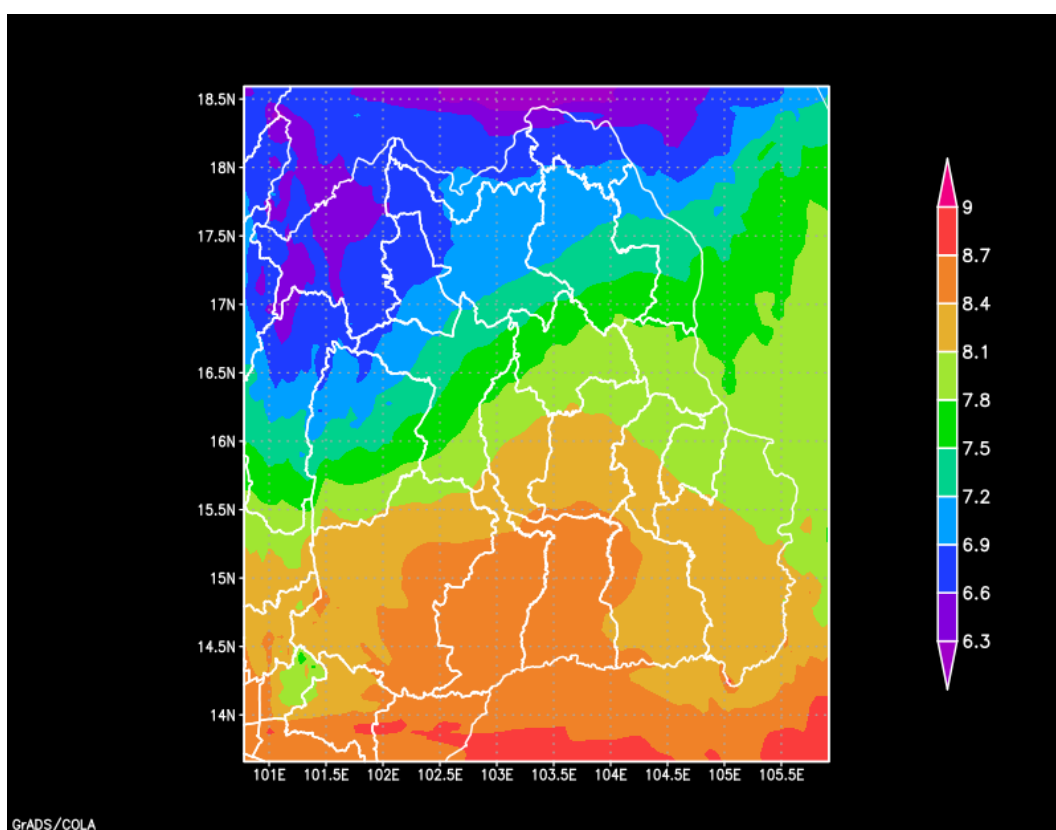


Рисунок 2.33 – Поле температуры воздуха в 15.03.2018 06Z

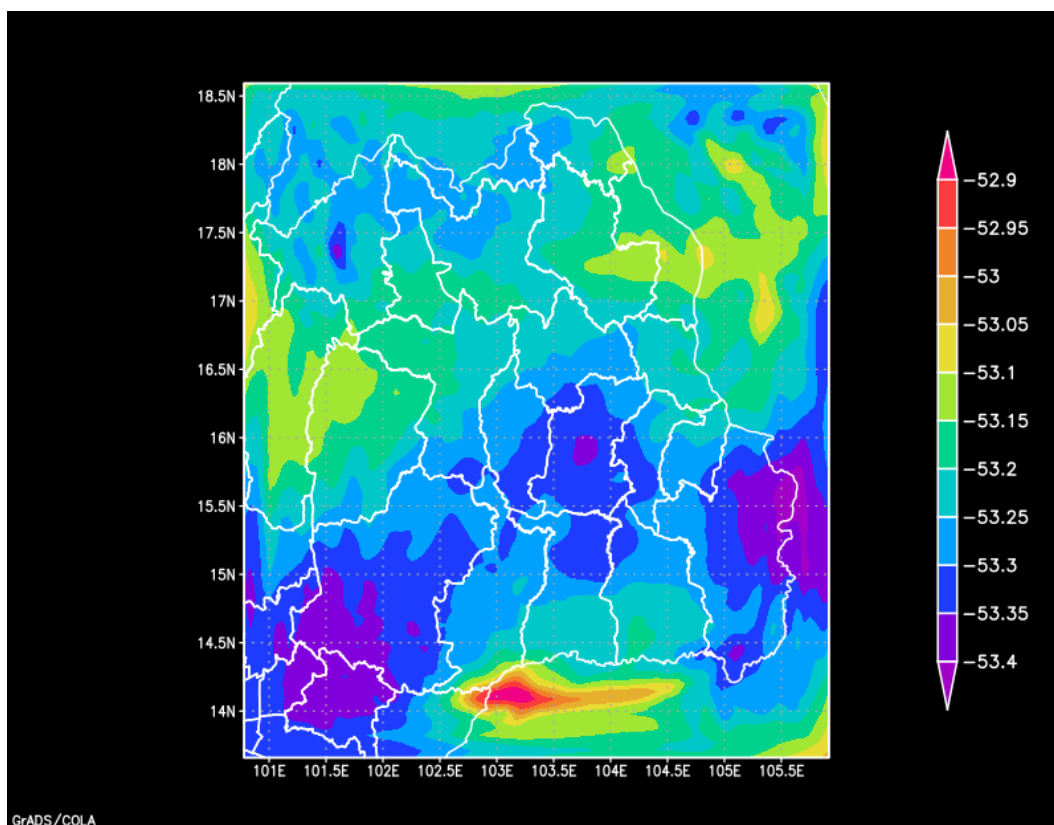


Рисунок 2.34 – Поле температуры воздуха в 16.03.2018 06Z

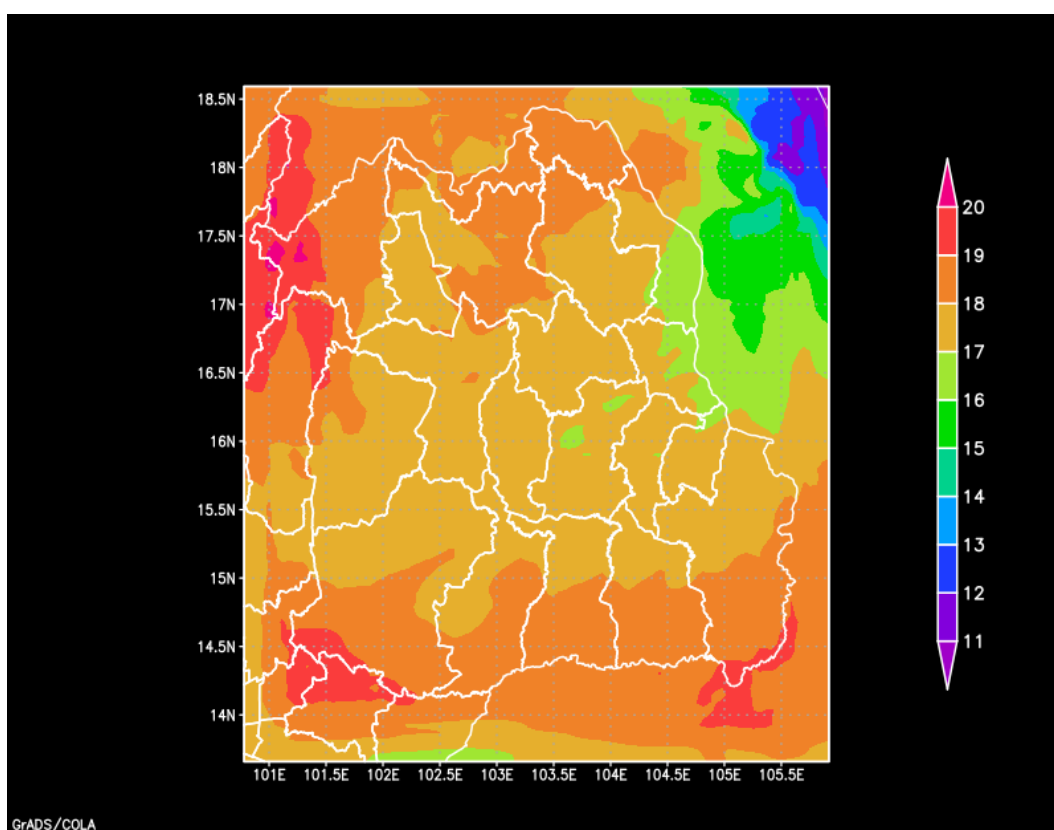


Рисунок 2.35 – Поле температуры воздуха в 17.03.2018 06Z

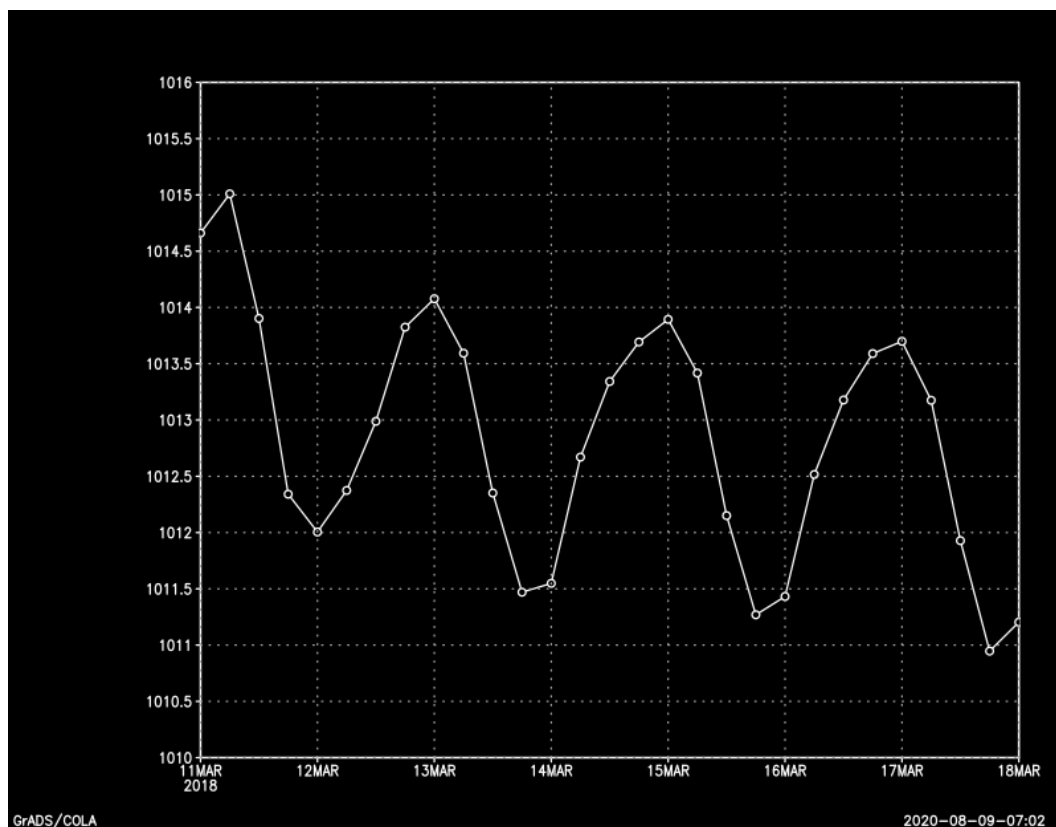


Рисунок 2.36 – Изменения давления.

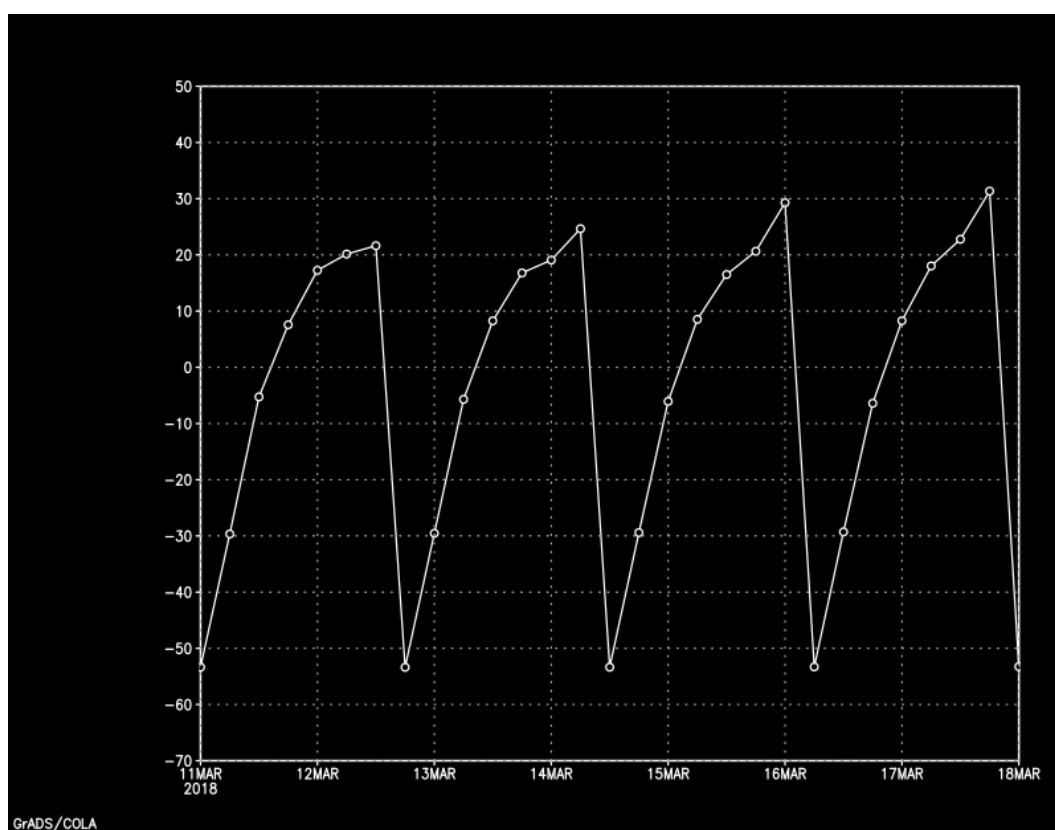


Рисунок 2.37 – Изменения температуры воздуха.

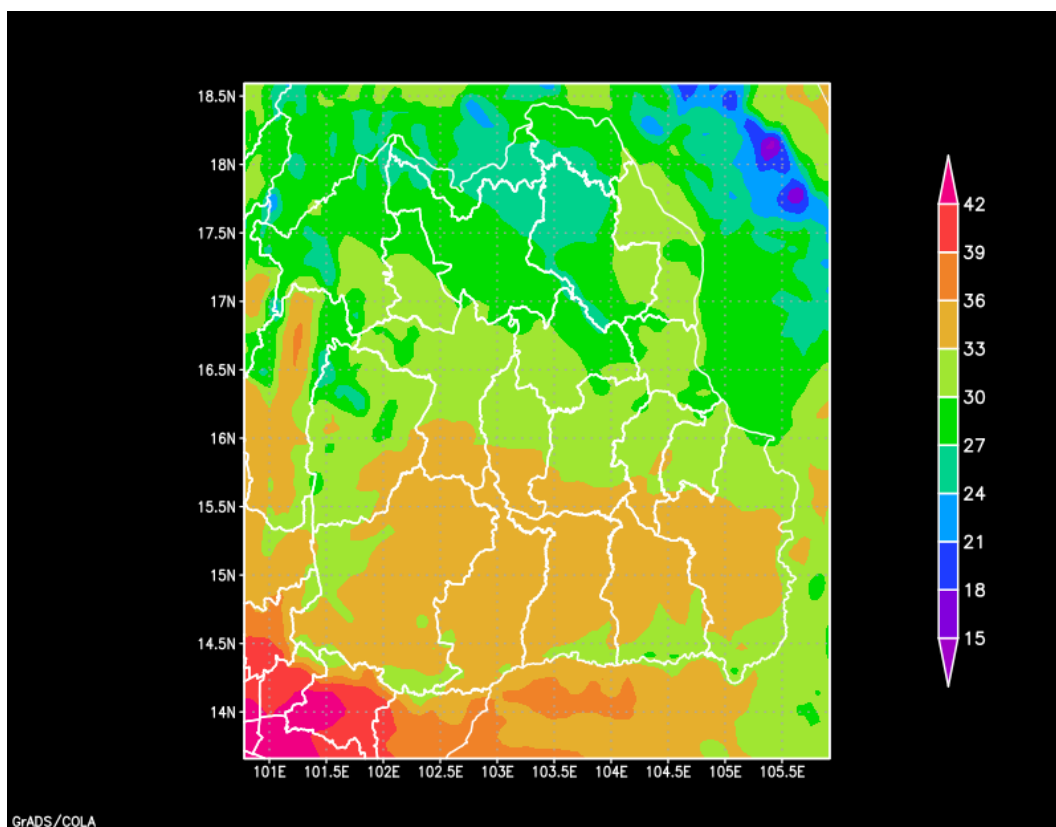


Рисунок 2.38 – Водность осадков в 11.03.2018 12Z

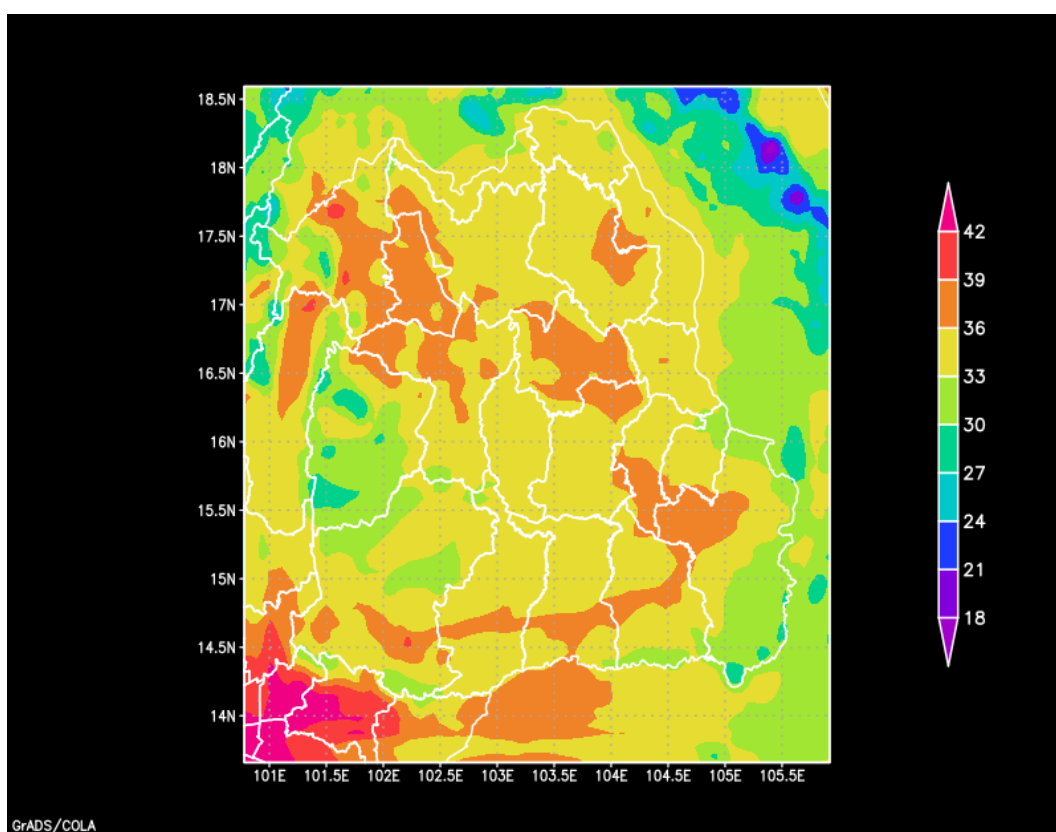


Рисунок 2.39 – Водность осадков в 12.03.2018 12Z

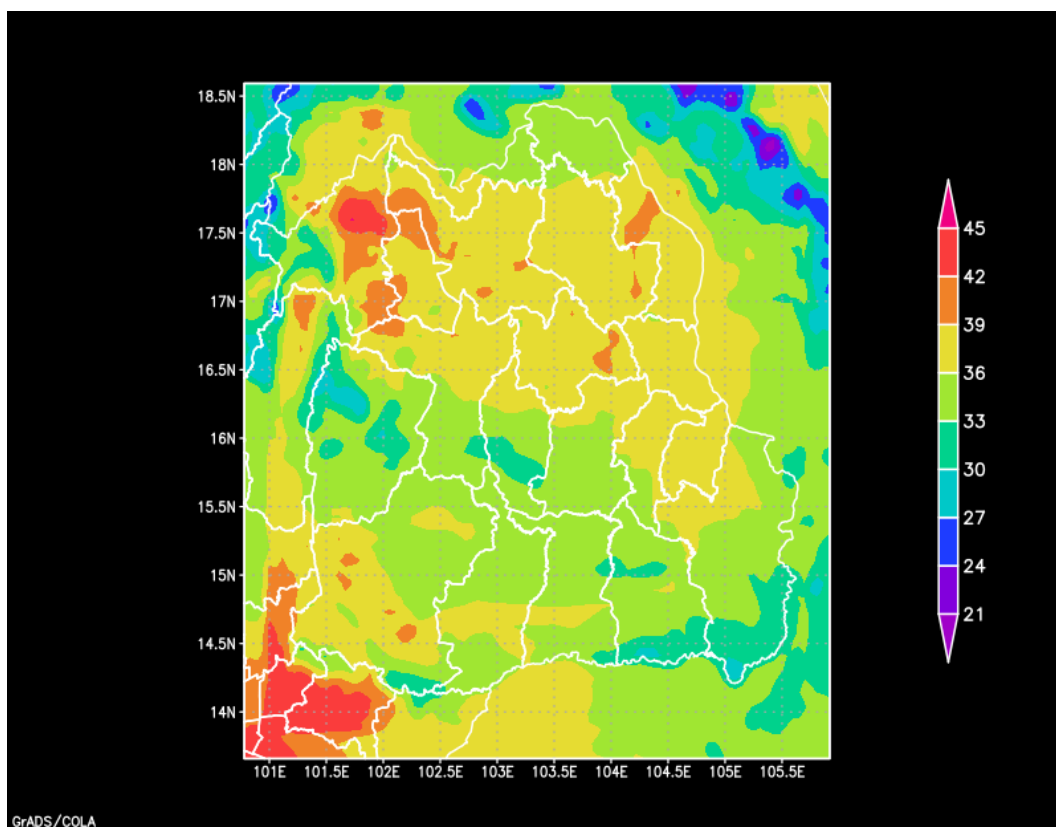


Рисунок 2.40 – Водность осадков в 13.03.2018 12Z

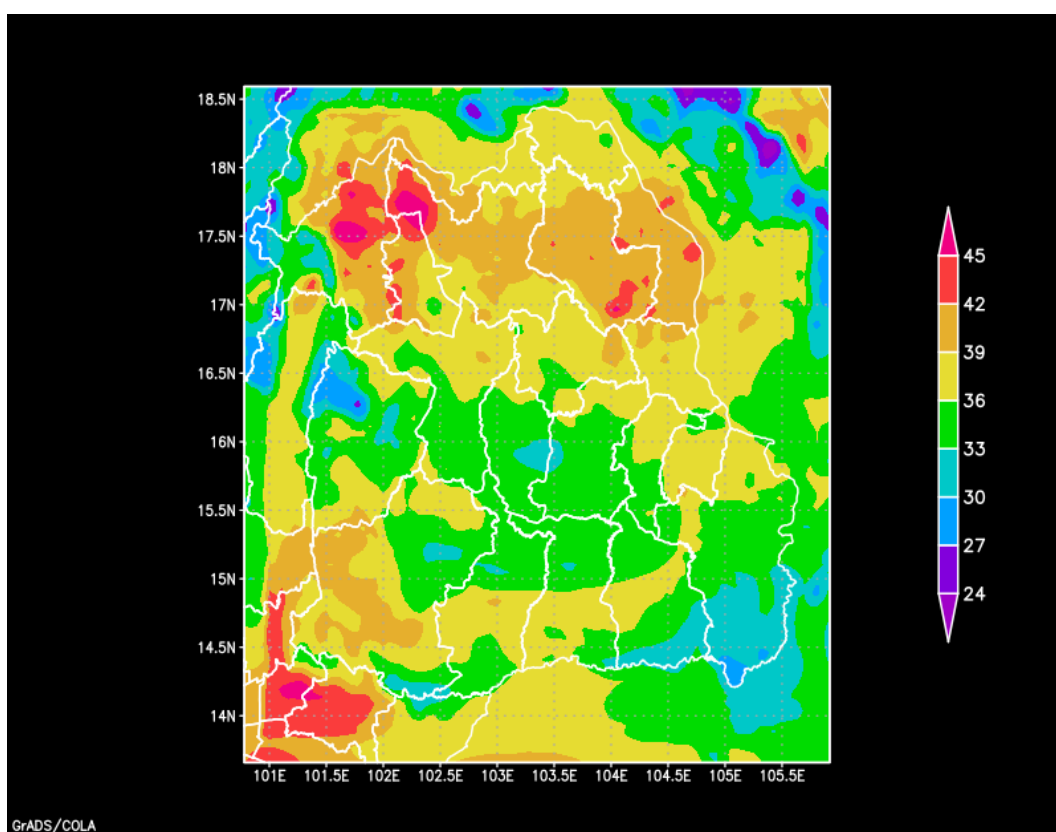


Рисунок 2.41 – Водность осадков в 14.03.2018 12Z

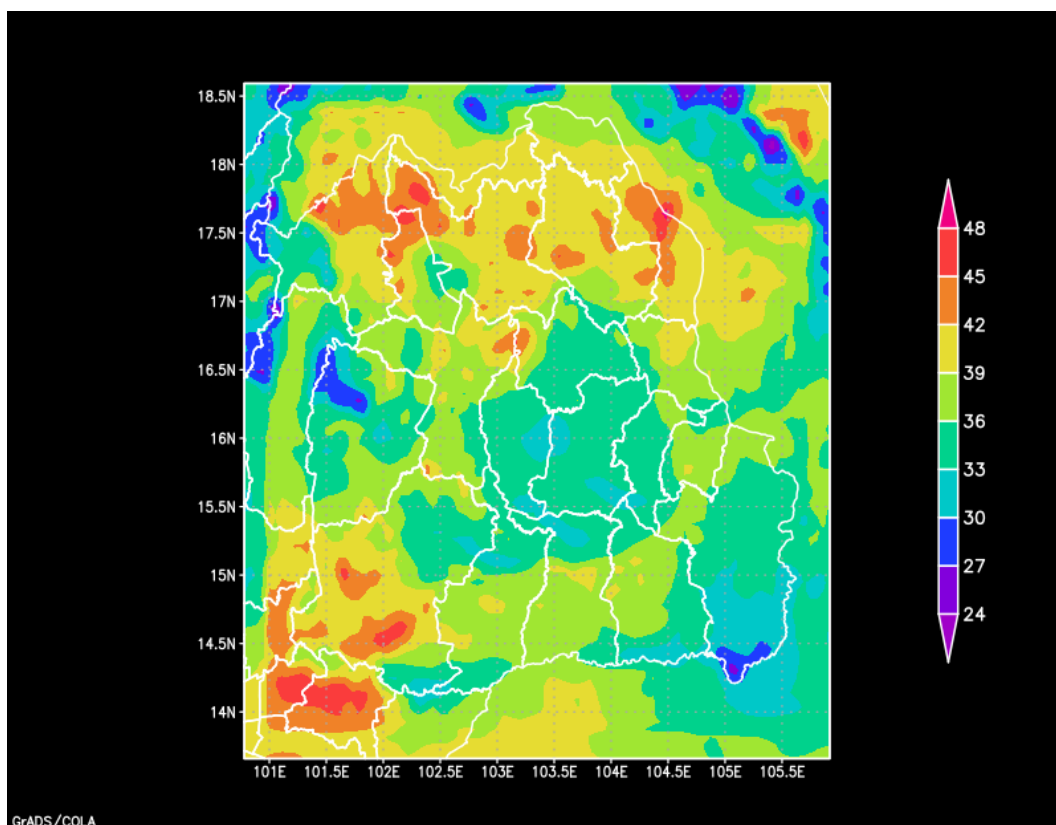


Рисунок 2.42 – Водность осадков в 15.03.2018 12Z

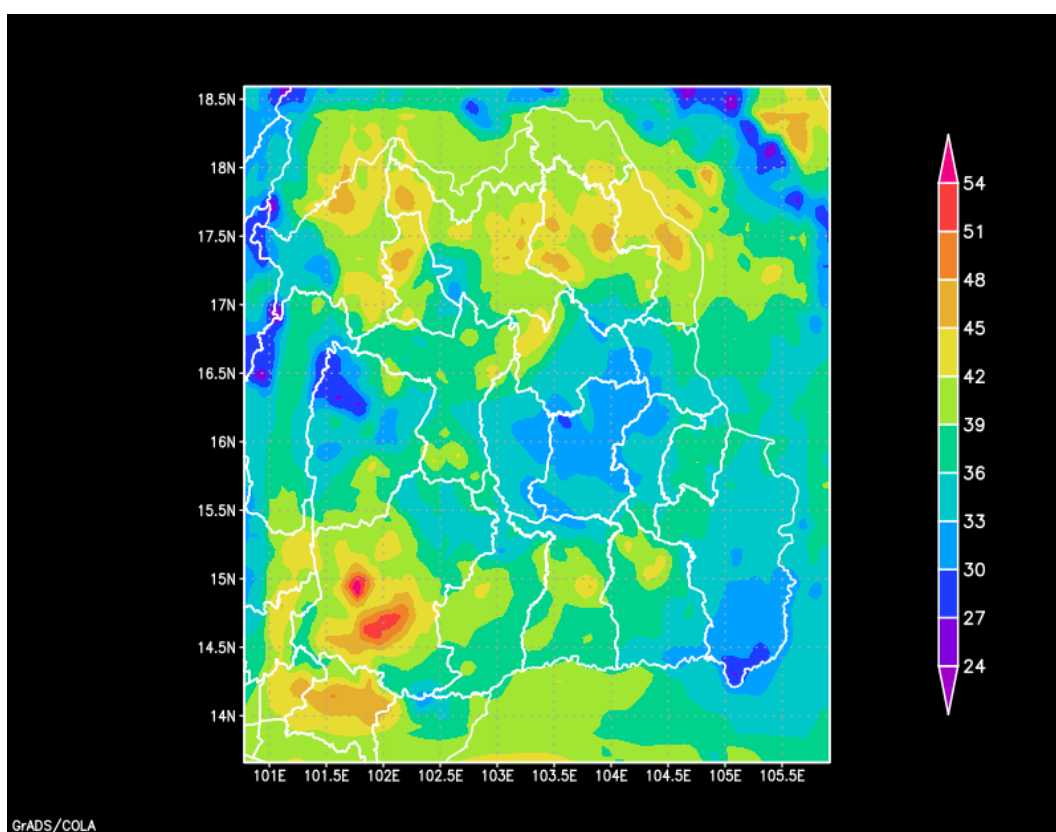


Рисунок 2.43 – Водность осадков в 16.03.2018 12Z

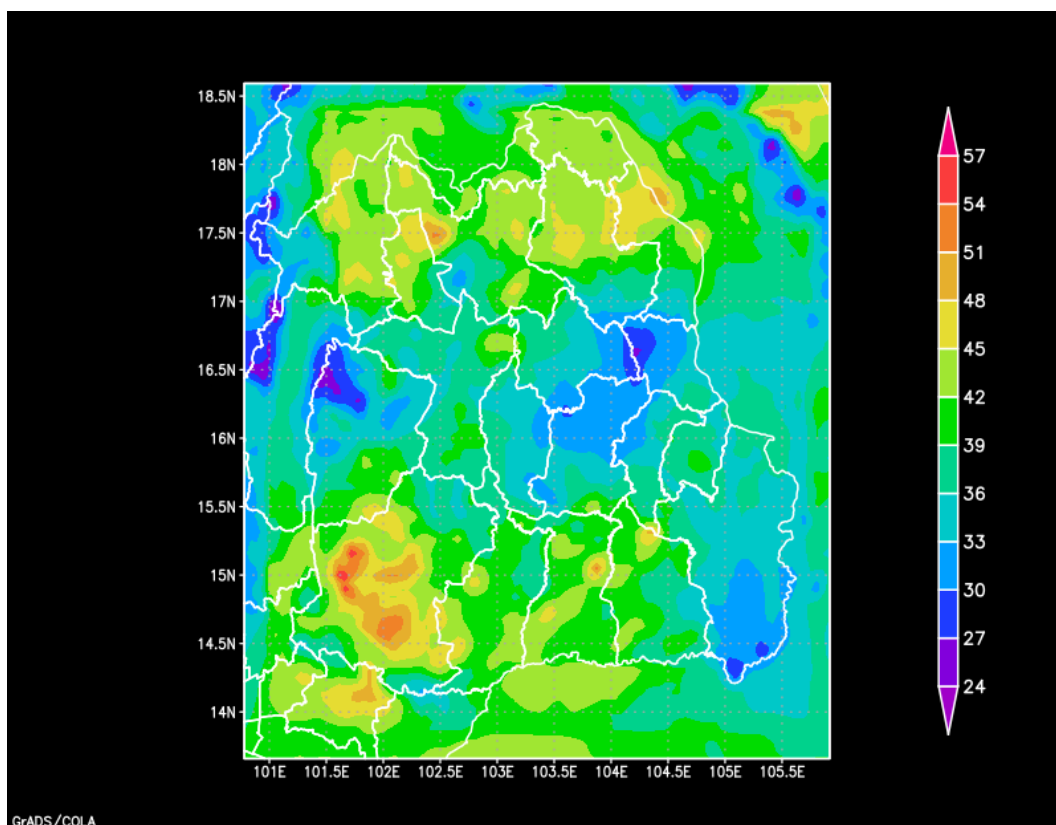


Рисунок 2.44 – Водность осадков в 17.03.2018 12Z

Согласно изображениям, если судить по колебаниям значения приземного давления и температуры воздуха на 06Z с вероятной областью влагозапаса осадков на 12Z. Даты 12, 14 и 16 марта 2018 года имеют шанс, что ливень может произойти из-за высокой температуры и высокого давления в полдень с большим количеством осадков вечером, обычно над верхней частью северо-восточного региона Таиланда вечером.

Согласно первому способу выполнение WRF через Cygwin затруднено из-за некоторой разницы между операционными системами. В качестве источника компиляции учебник и исполнение были основаны на структуре Linux. С другой стороны, структура Cygwin использует команды другого типа. Кроме того, сообществу WRF не хватило информации для реализации WRF на Cygwin, что приводит к затруднениям при поиске решения при возникновении проблемы.

Таким образом, пользователю все еще не хватает знаний в области компьютерного языка, в результате чего тратят много времени на поиск решений для решения задач по второму способу. Это привело к использованию третьего метода через wrf-python.

Помимо этого, в онлайн-руководстве также указаны другие методы постобработки данных WRF. Такие как NCL, RIP4 и многие другие, которые пользователь еще не экспериментировал.

3 Описание конфигурации WRF

Следующие эксперименты проводились с другой конфигурацией модели. Моделирование с использованием WRF-ARW проводится для региона столицы Бангкока, который расположен в центральном Таиланде.

Период прогноза будет составлять 7 недель по 6 часов в течение мая из-за колебаний количества осадков от сезона к летнему сезону дождей.

Основные параметры модели были заданы следующим образом

- Моделирование периода запускается на 7 дней (`run_days = 7`).
- Результаты будут прогнозироваться каждые 6 часов (`interval_seconds = 21600`).
- Разрешение сетки составляет 2 километра как по оси x, так и по оси y (`dx, dy = 2000`).
- Шаг по времени при 12 секунд (`time_step = 12`).
- Оба пространства сетки в измерениях запад-восток и юг-север в 50 (`e_we, e_sn = 50`) (рисунок 3.1).
- Разрешение исходных данных, используемых при интерполяции статических наземных данных, составляет 30 секунд (`geog_data_res = '30s'`).
- Проекция Меркатора выбирается как строка символов, определяющая проекцию области моделирования (`map_proj = 'mercator'`).
- Реальные значения, определяющие широту и долготу местоположения Бангкока, составляют 13,758 северной широты, 100,616 восточной долготы (`ref_lat = 13.758, ref_lon = 100.616,`).
- Использовались 4 метеостанции в Бангкоке, а именно: BangkokDonMuang (BDM), BangkokMeteropolis (BM), BangNaAgro (BNA), BANGKOKPORT (BP) для верификации прогнозов.

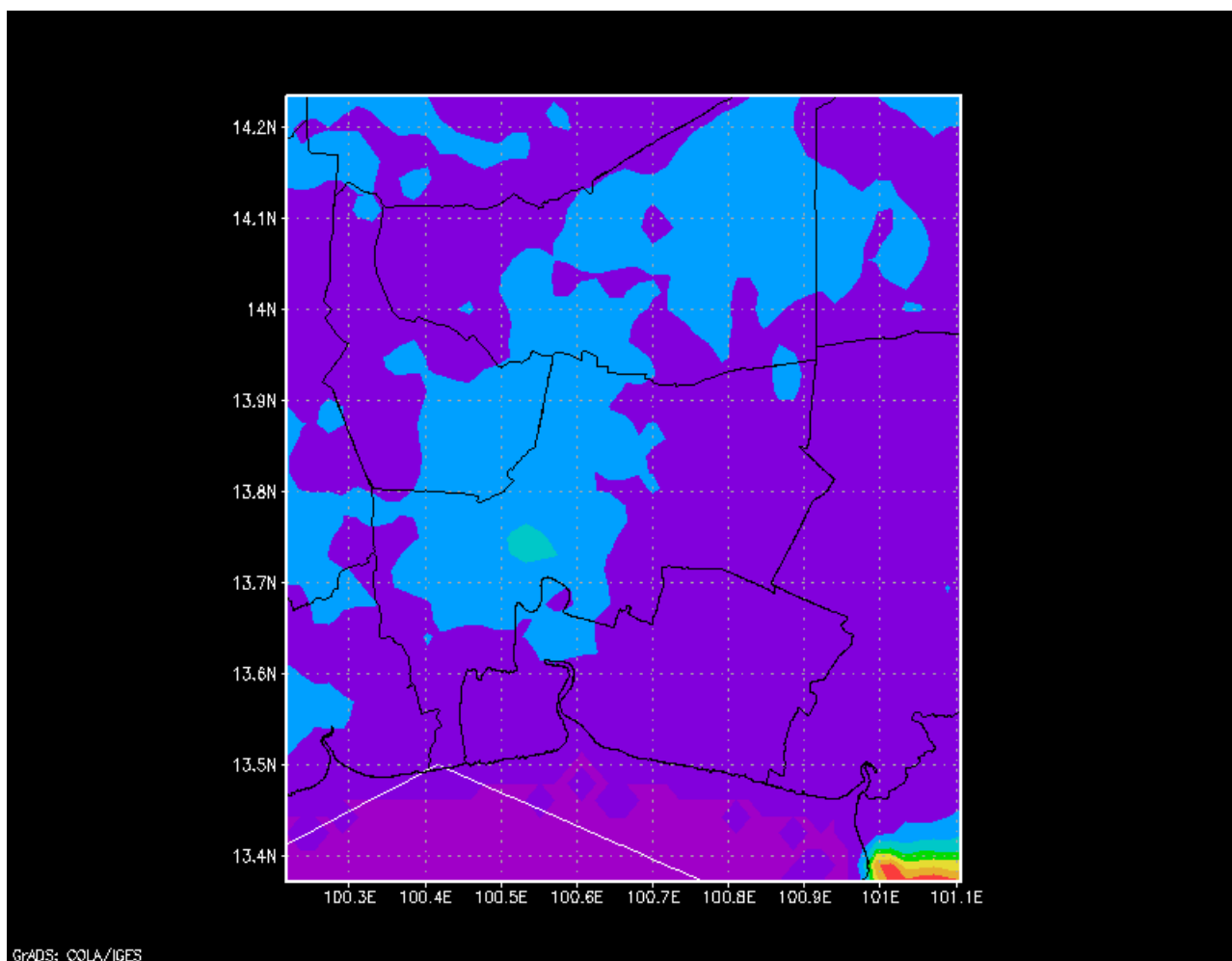


Рисунок 3.1 –Область моделирования. Район Бангкока, расположенный в центре региона

4 Параметризации физических процессов

В ходе исследования были выбраны эти параметризации;

1. Для микрофизики: WRF одномоментная 6-классная схема (Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006) (mp_physics = 6) - схема с фазовыми процессами для льда, снега и крупы, подходящая для моделирования с высоким разрешением.
2. Для длинноволнового излучения: модель быстрого переноса излучения (Mlawer, Eli. J. и др., 1997) (ra_lw_physics = 1) - точная схема с использованием справочных таблиц для определения эффективности. Учитывает несколько диапазонов и видов микрофизических процессов.
3. Для коротковолнового излучения: схема Dudhia (Dudhia, J., 1989) (ra_sw_physics = 1) - простое интегрирование сверху вниз, обеспечивающая эффективное поглощение и рассеяние облаков и при ясном небе.
4. Для поверхностного слоя: пересмотренная схема поверхностного слоя MM5 (sf_sfclay_physics = 1) - на основе подхода Мони́на-Обухова с вязким подслоем Карслона-Боланда и стандартных функций подобия из справочных таблиц, но удалены ограничения и используются обновленные функции устойчивости (Jimenez и др., 2012). Параметр шероховатости для температуры и влажности (или коэффициенты теплообмена и влаги) над океаном используют формулу COARE 3 (Fairall и др., 2003).
5. Для поверхности земли: Модель поверхности земли Ноа (sf_surface_physics = 2) - Единая схема NCEP / NCAR / AFWA с температурой и влажностью почвы в четырех слоях, частичным снежным покровом и физикой мерзлых почв.
6. Для параметризации кучевых облаков использовались 3 схемы: схема Каина-Фрича (Kain, John S., 2004) – подсеточная схема глубокой и мелкой конвекции с использованием подхода потока масс с нисходящими потоками и шкалой времени удаления CAPE (cu_physics = 1), схема ансамблевая Грелля-Девеньи (Grell, G.A. and Freitas, S. R., 2014) – многопараметрический метод

ансамбля с множественным замыканием, обычно с 144 элементами подсетки (`cu_physics = 3`), новая схема Тидтке (Zhang, C. and Y. Wang, 2017) (`cu_physics = 16`) - эта версия похожа на схему Тидтке (`cu_physics = 6`) – схему типа потока массы с временной шкалой удаления CAPE, мелкой компонентой и переносом импульса.

7. Также были рассчитаны потоки тепла и влаги с поверхности (`isfflx = 1`).

8. Благодаря использованию модели быстрого переноса излучения и схемы Дудхиа, также был рассчитан эффект облачности на оптическую толщину в излучении (`icloud = 1`).

9. В качестве данных о землепользовании и категории почв использовались WPS / георешетка (`surface_input_source = 1`).

10. Выбрана модель земной поверхности Ноя (`num_soil_layers = 4`).

5 Оценка результатов прогноза

Использовались 4 метеостанции в Бангкоке, а именно:

BangkokDonMuang (BDM),

BangkokMeteropolis (BM),

BangNaAgro (BNA),

BANGKOKPORT (BP).

Во время первоначального теста образцы трех настроек (mp6cu1 – WRF одномоментная 6-классная схема со схемой Каина-Фрича, mp6cu3 – WRF одномоментная 6-классная схема со схемой ансамбля Грелля-Девеньи, и mp6cu16 – WRF одномоментная 6-классная схема со схемой новоя Тидтке) от каждой станции сравниваются с фактическими данными о дожде, полученными, как показано на рисунках ниже.

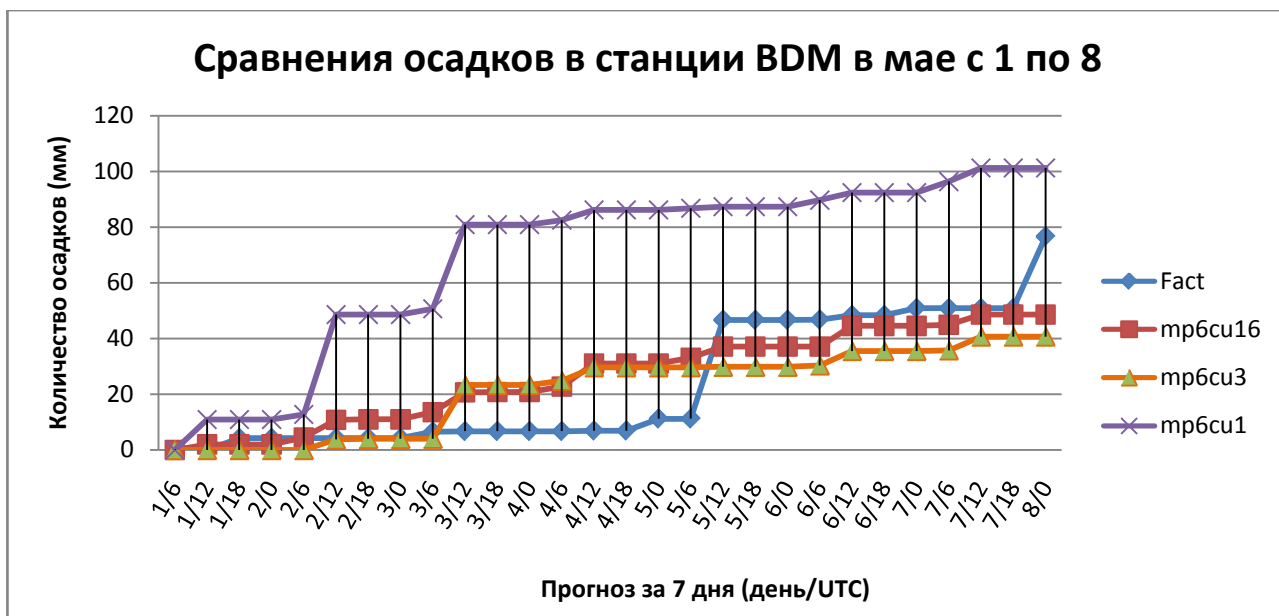


Рисунок 5.1 – Пример сравнения прогноза на 7 дней на станции BDM

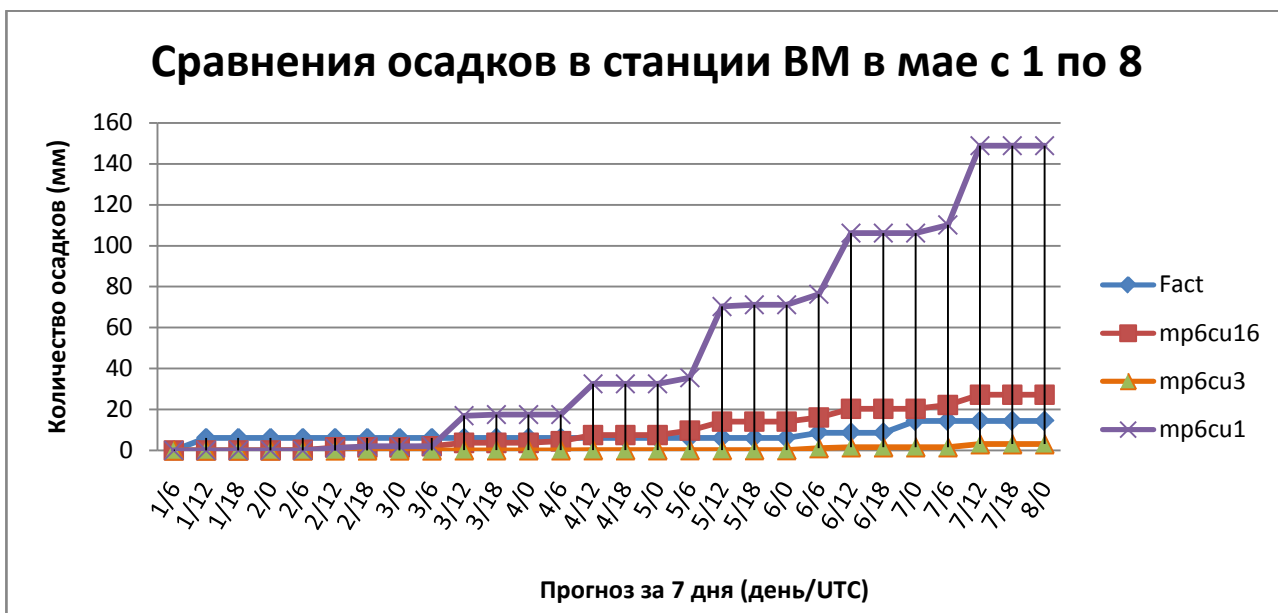


Рисунок 5.2 – Пример сравнения прогноза за 7 дня на станции ВМ

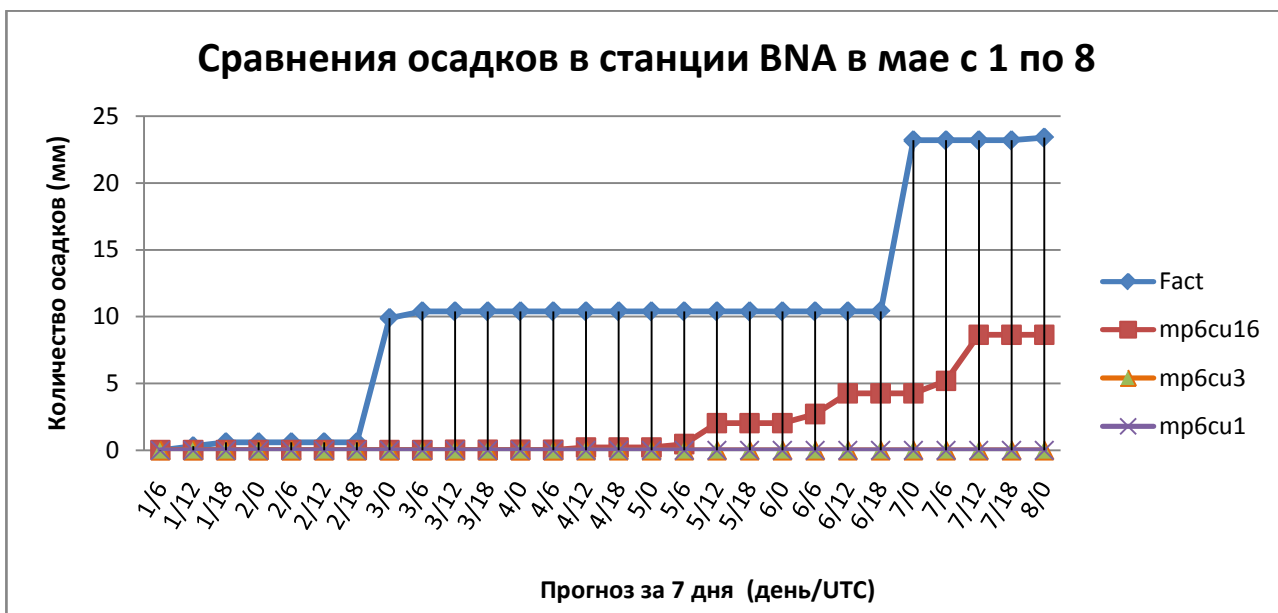


Рисунок 5.3 – Пример сравнения прогноза на 7 дней на станции ВНА

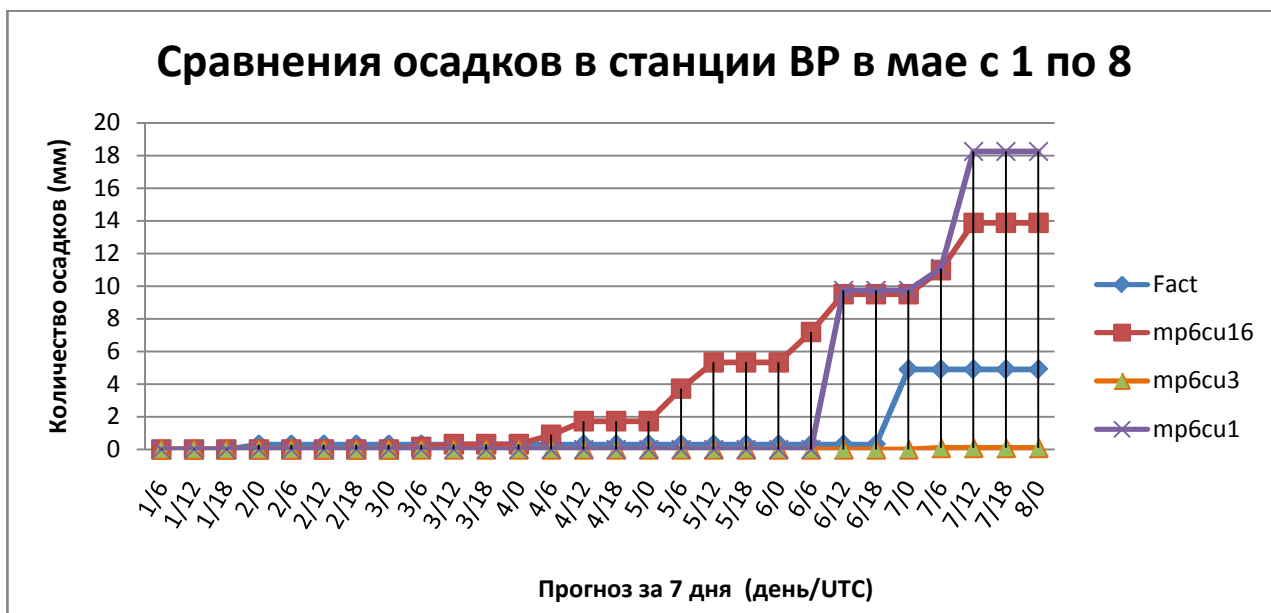


Рисунок 5.4 – Пример сравнения прогноза на 7 дней на станции ВР.

Результаты настройки mp6cu1 были отброшены из-за того, что данные прогноза слишком далеки от фактических данных.

Кроме того, были проанализированы результаты прогноза осадков, температуры на высоте 2 м и ветер (рисунки 5.5–5.7).

Картина температуры на высоте 2 м и ветра будет использоваться для учета фактора прогноза.

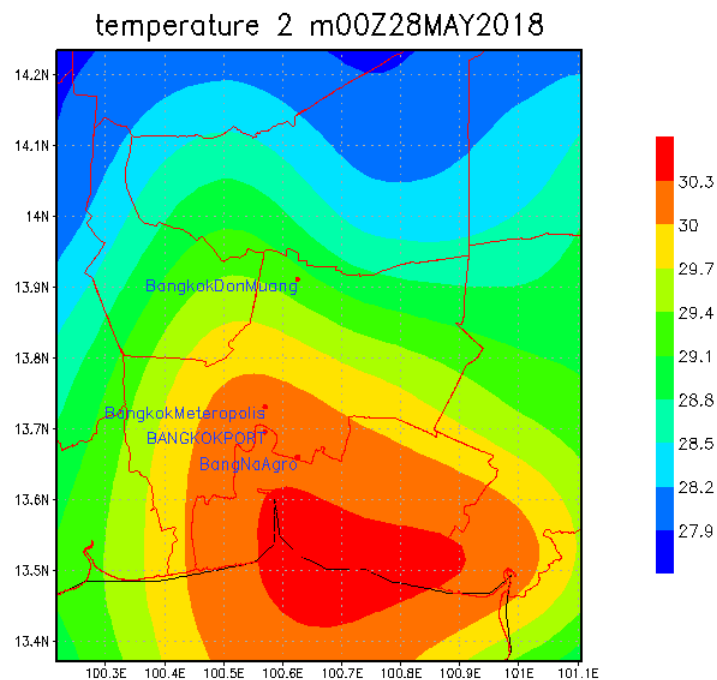


Рисунок 5.5 – Пример прогноза температуры воздуха на 2 метров

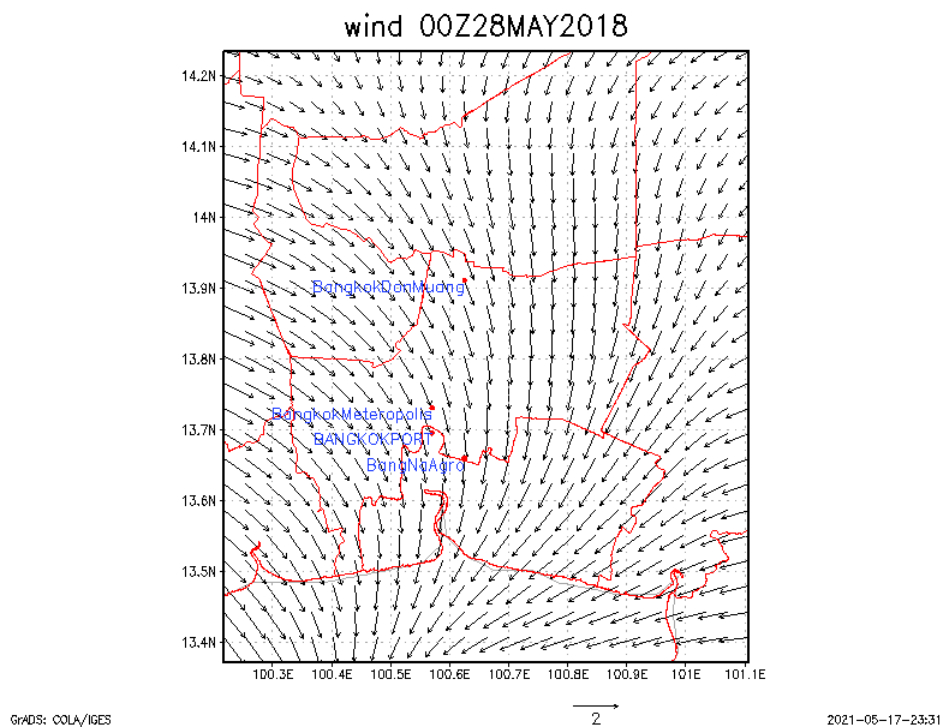


Рисунок 5.6 – Прогноз ветра

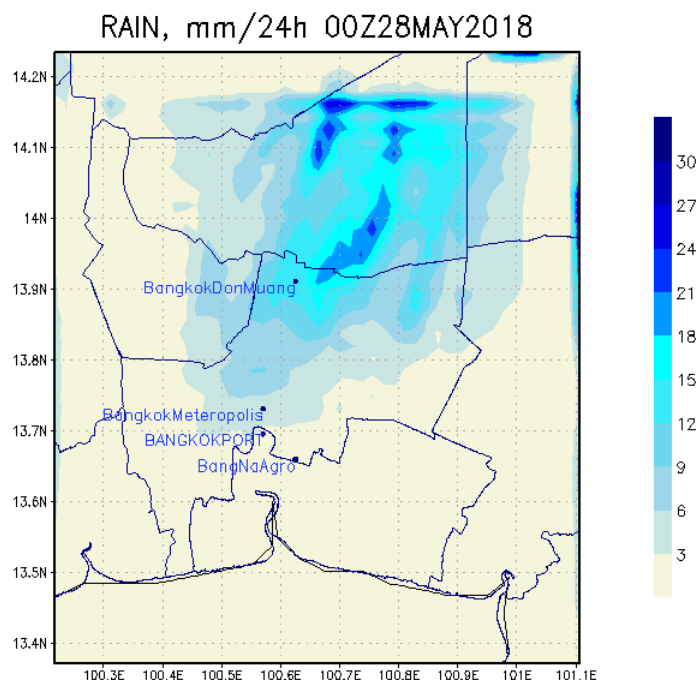


Рисунок 5.7 – Прогноз осадков

Образцы изображений прогноза WRF для каждого 6-часового периода с параметризацией «трбси16» показаны на рисунках 5.8 - 5.11.

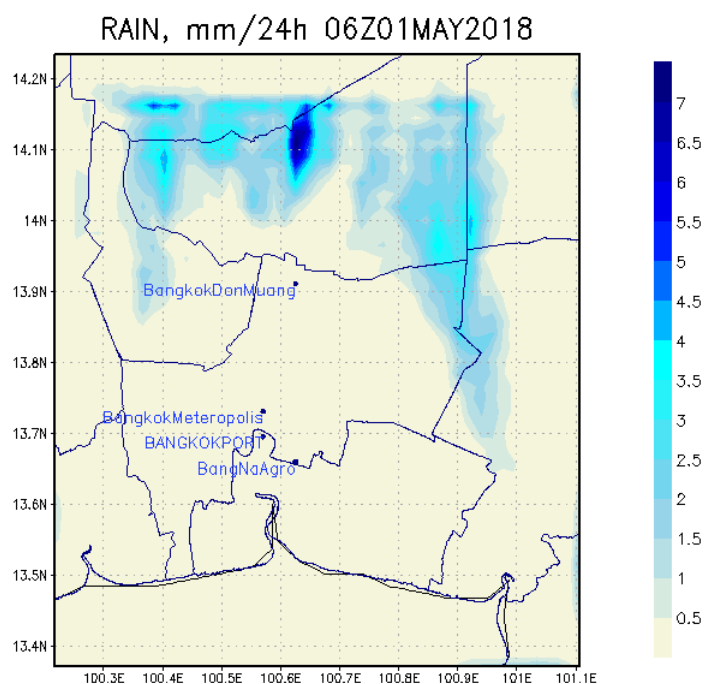


Рисунок 5.8 –Прогноз осадков в 01.05.2018 06UTC.

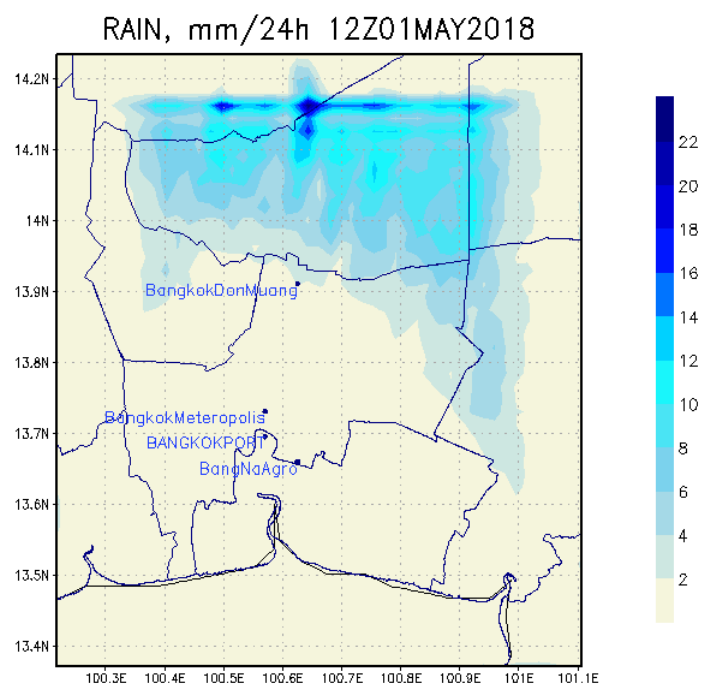


Рисунок 5.9 –Прогноз осадков в 01.05.2018 12UTC

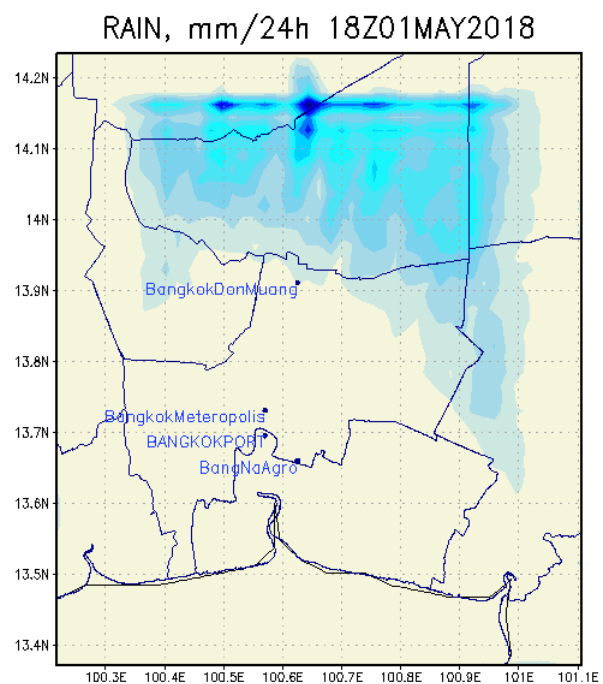


Рисунок 5.10 –Прогноз осадков в 01.05.2018 18UTC.

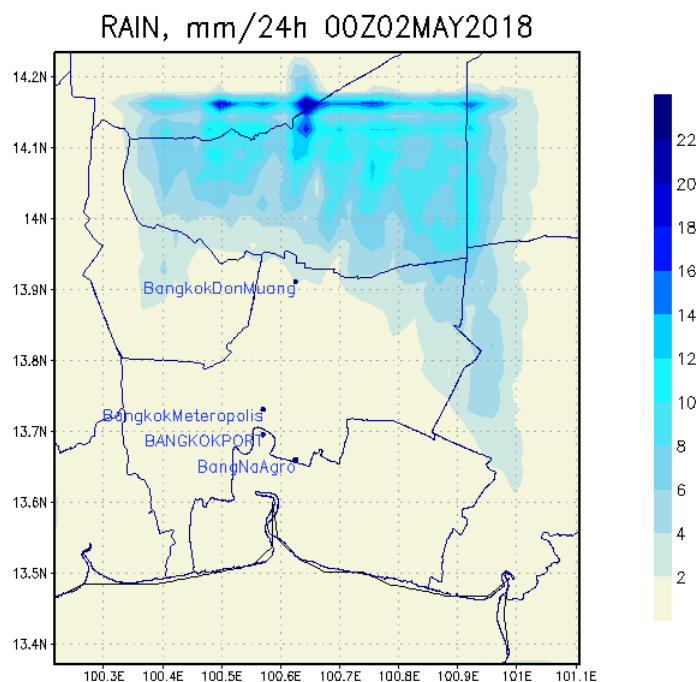


Рисунок 5.11 –Прогноз осадков в 02.05.2018 00UTC.

Результаты прогнозов с использованием параметризации «трбси3» представлены на рисунках 5.12 – 5.15.

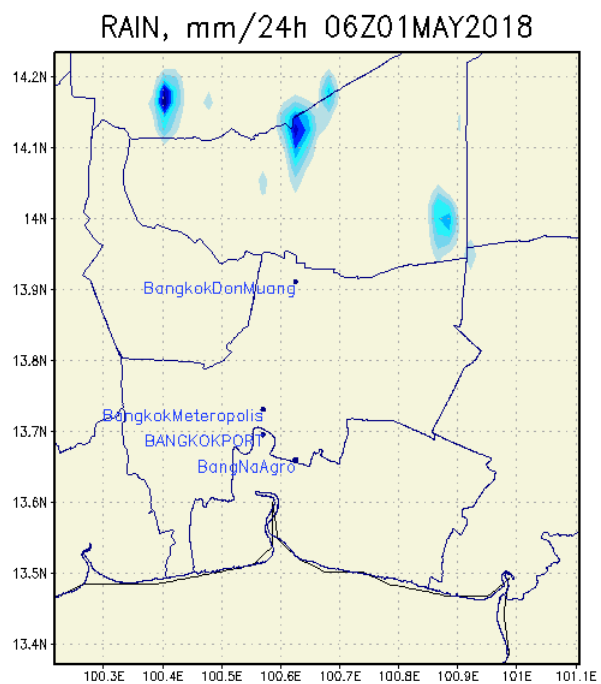


Рисунок 5.12Прогноз осадков в 01.05.2018 06UTC.

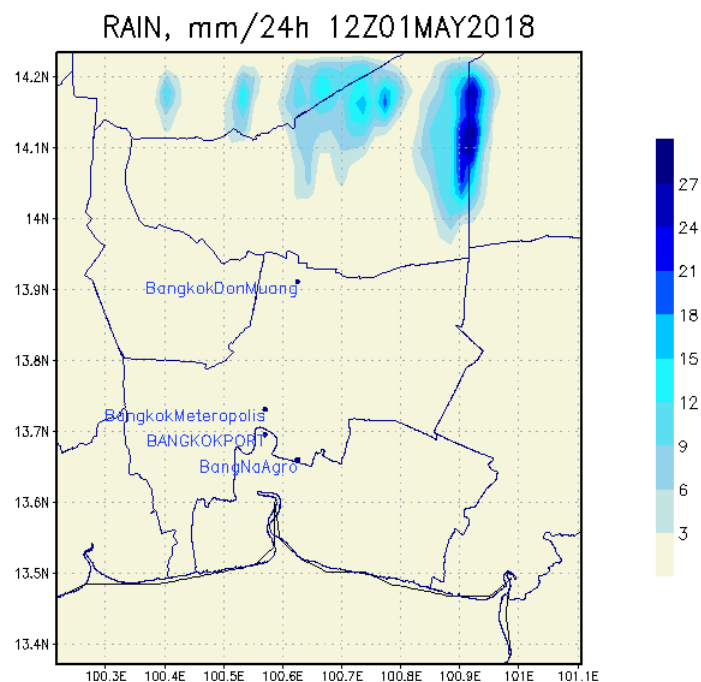


Рисунок 5.13 – Пример Прогноз осадков в 01.05.2018 12UTC.

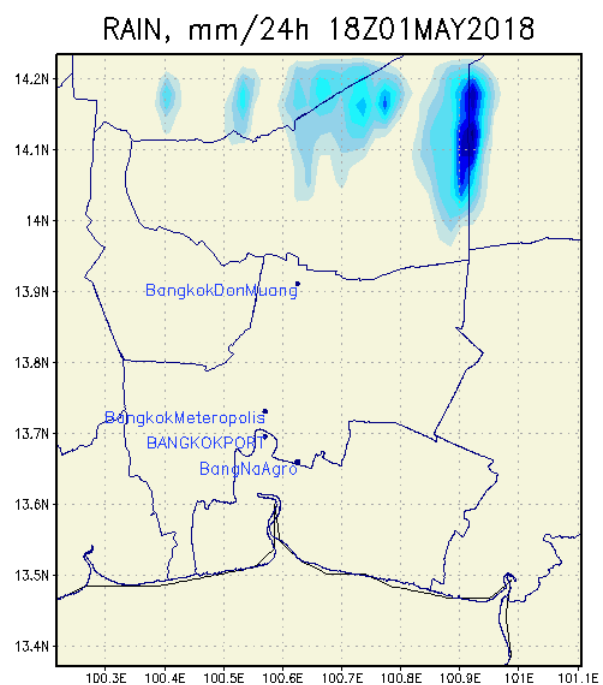


Рисунок 5.14 – Прогноз осадков в 01.05.2018 18UTC.

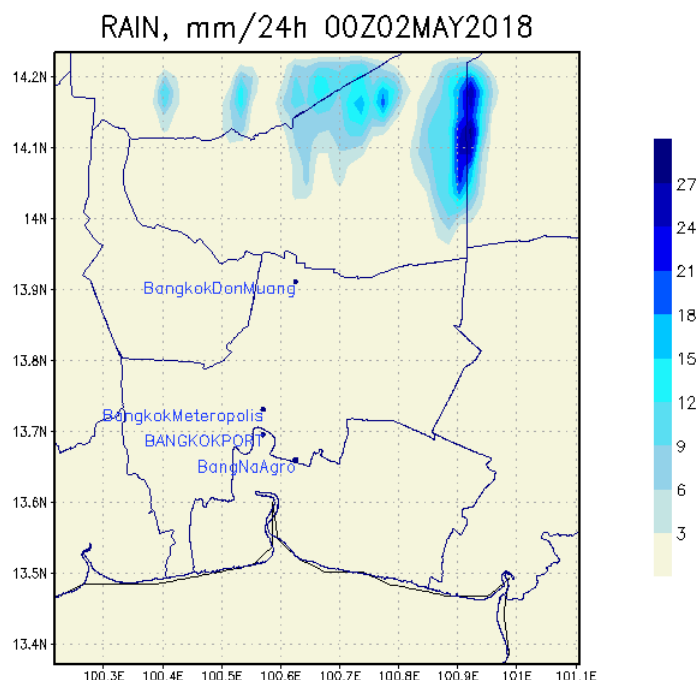


Рисунок 5.15 –Прогноз осадков в 02.05.2018 00UTC.

Окончательные оценки результатов прогноза для каждого 7-дневного периода включали только 2 настройки: mp6cu16 и mp6cu3. Эти результаты показаны на рисунках 5.16 – 5.19

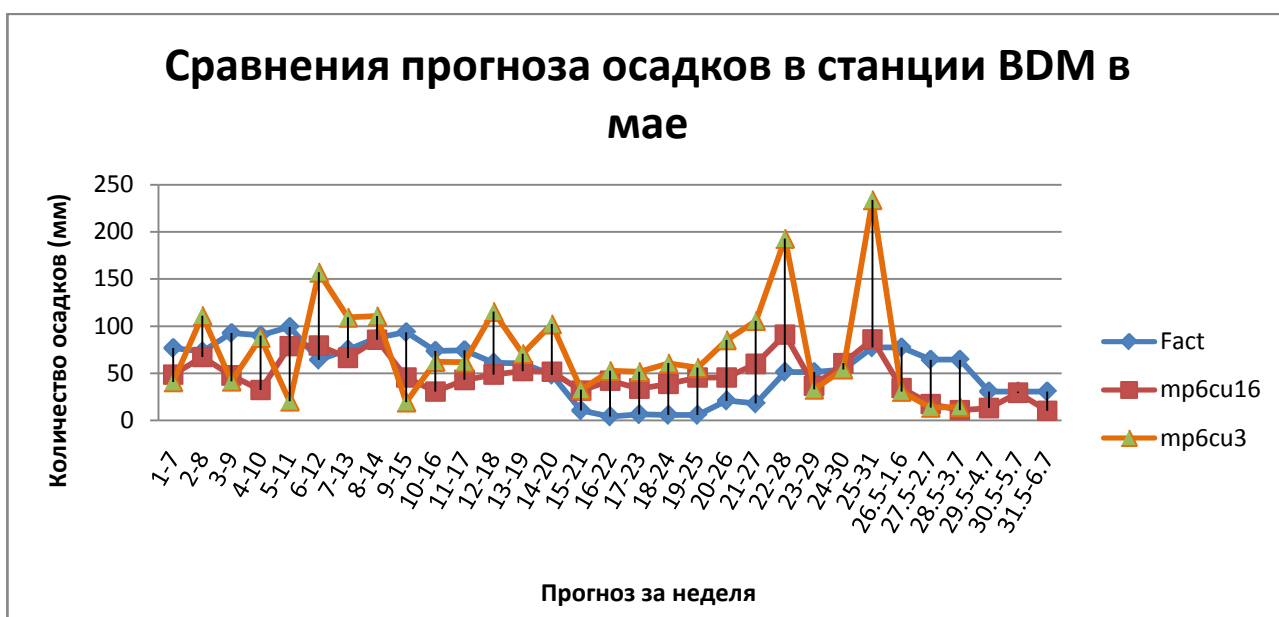


Рисунок 5.16 – Сравнение прогноза осадков станции BDM.

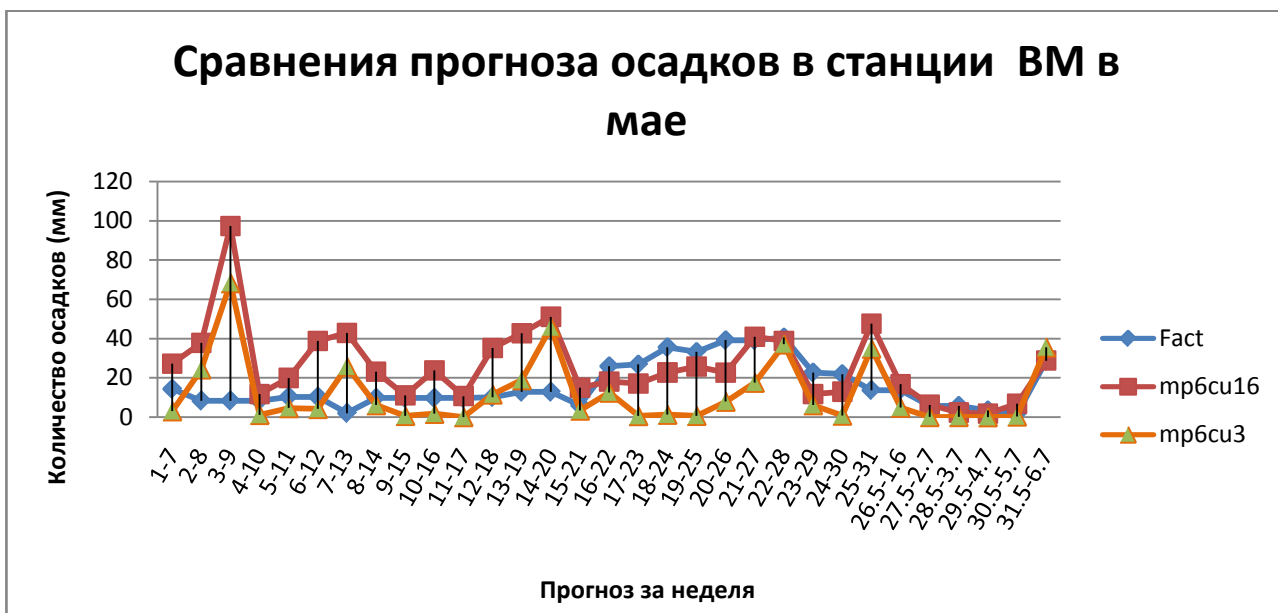


Рисунок 5.17 – Сравнение прогноза осадков станции ВМ.

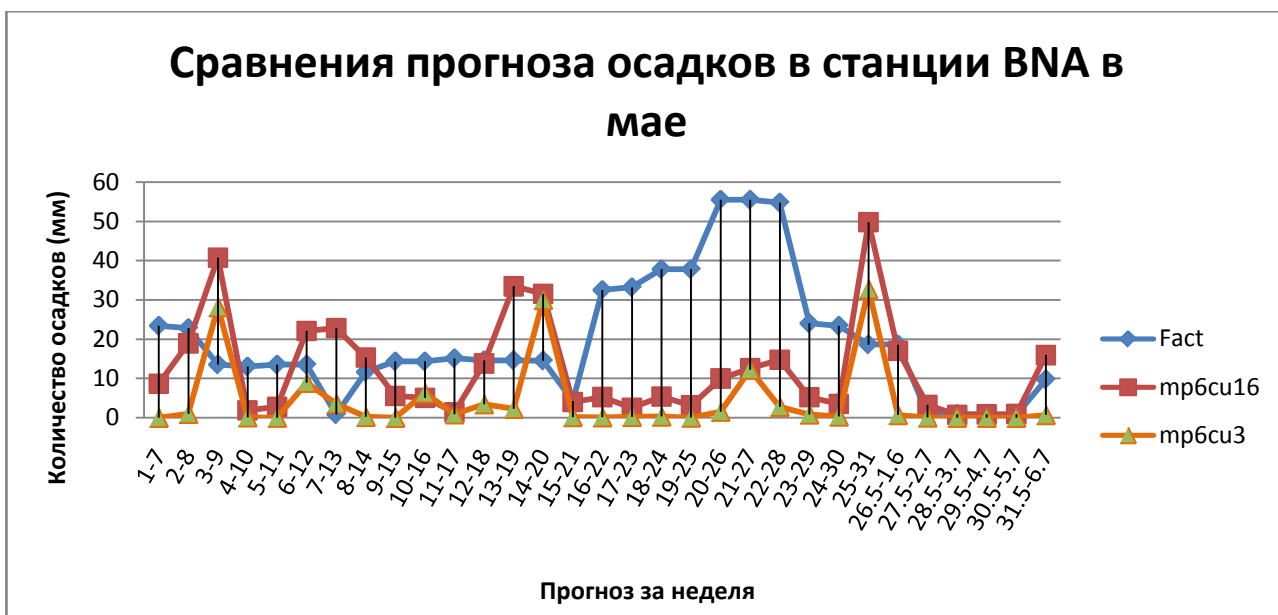


Рисунок 5.18 – Сравнение прогноза осадков станции ВНА.

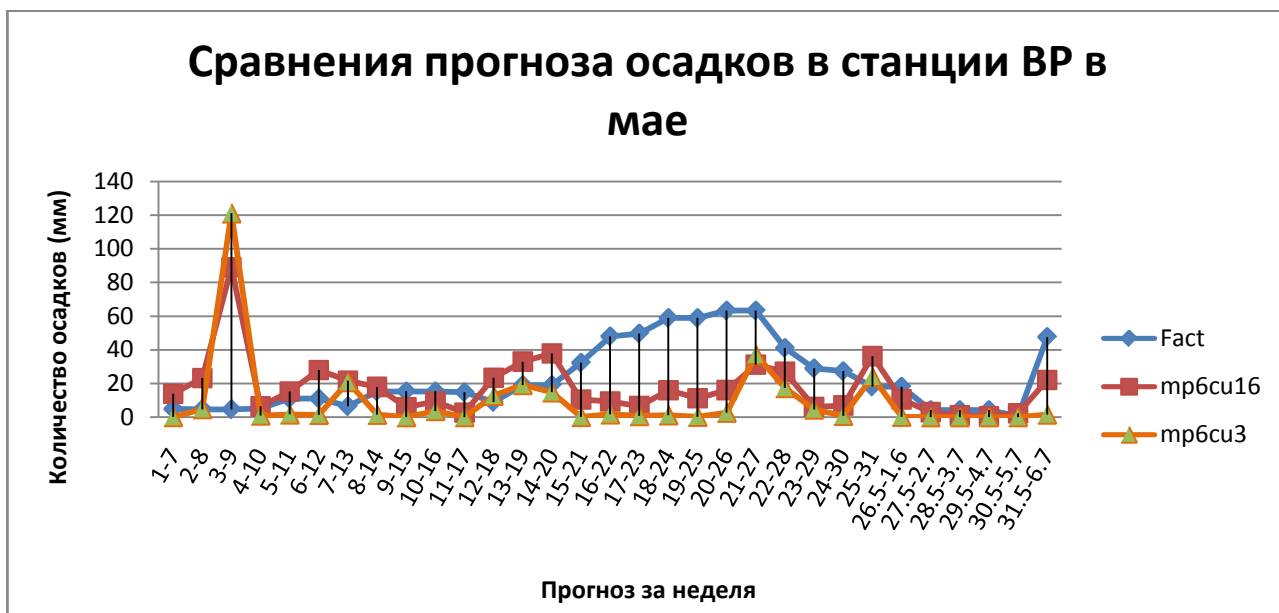


Рисунок 5.19 – Сравнение прогноза осадков станции ВР.

Заключение

При рассмотрении результата при фиксированной параметризации исключаются схемы кучевых облаков. Среди трех схем кучевых облаков схема Кейна-Фрича (cu1) показала, что осадки не подходят для использования по сравнению с фактическими данными, поскольку сам прогноз либо слишком сильно завышен, либо занижен, что может привести к ложным прогнозам метеоролога при использовании в качестве одного из факторов прогноза.

В то время как две другие схемы - схема ансамбля Грелля-Девеньи (cu3) и новая схема Тидтке (cu16) оказались полезными согласно результатам, показанным на рисунках 2-5 и рисунках 11-14 из-за большей части данные указывают на меньшее отклонение от фактических данных. Однако большую часть времени при рассмотрении статистических результатов каждый из 6-часового прогноза и новая схема Тидтке дает большое отклонение от фактических данных, в то время как ансамблевая схема Грелля-Девеньи показывает небольшое отклонение.

Помимо этих фактов, оба фактора могут использоваться в качестве фактора для прогнозирования, что зависит от суждения метеорологов о необходимости внедрения и принятия решения до выпуска прогноза погоды.

Существуют и другие возможности комбинирования множества параметризаций, которые могут дать лучшие результаты и обеспечить меньшее отклонение прогноза от фактических данных благодаря дальнейшим исследованиям.

Список использованных источников

1. A revised scheme for the WRF surface layer formulation [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/SURFACE_LAYER/revised_MM5.pdf.
2. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/Grell_Freitas.pdf.
3. Chapter 5: WRFModel [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.3/users_guide_chap5.html.
4. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/LAND_SURFACE/noah.pdf.
5. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/SW_LW/Dudhia.pdf.
6. Projected Future Changes of Tropical Cyclone Activity over the Western North and South Pacific in a 20-km-Mesh Regional Climate Model [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/New_Tiedtke.pdf.
7. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/SW_LW/RRTM.pdf.

8. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update [Электронныйресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/Kain_Fritsch.pdf.

9. The WRF single–moment 6–class microphysics scheme (WSM6) [Электронныйресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/MICRO_PHYS/WSM6.pdf.

10. User’s Guides for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System, Version 4 [Электронныйресурс]. Режим доступа: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/contents.html.