

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра системного программирования**

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент,

нач. отд. ПАО «Челябэнергосбыт»

_____ И.В. Барабанщиков

« ____ » _____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

_____ Л.Б. Соколинский

« ____ » _____ 2018 г.

**РАЗРАБОТКА РЕДАКТОРА ВХОДНЫХ ДАННЫХ
ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДЕЛЬЮ
WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 02.04.02.2018.115-077.ВКР

Научный руководитель
д-р геогр. наук, канд. физ.-мат. наук,
профессор кафедры СП

_____ С.М. Абдуллаев

« ____ » _____ 2018 г.

Автор работы

студент группы КЭ-220

_____ В.В. Мокшанцев

« ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
(нормоконтролер)

_____ О.Н. Иванова

« ____ » _____ 2018 г.

Челябинск-2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**"Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет) "**
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра системного программирования

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

_____ Л.Б. Соколинский

« ____ » _____ 2018 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы магистра
студенту группы КЭ-220 (ВМИ-220) Мокшанцеву Владиславу Викторовичу,
обучающемуся по направлению
02.04.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии»
(магистерская программа «Технологии разработки высоконагруженных систем»)

- 1. Тема работы** (утверждена приказом ректора от 04.06.2018 № 580)
Разработка редактора входных данных для численных экспериментов с моделью
Weather Research and Forecasting (WRF)
- 2. Срок сдачи студентом законченной работы:** 05.06.2018 г.
- 3. Исходные данные к работе**
3.1 ARW UsersGuide. [Электронный ресурс] URL:
http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.9/ARWUsersGuideV3.9.pdf
(дата обращения: 20.12.2017).
- 4. Перечень подлежащих разработке вопросов**
4.1 Изучение методической документации WRF Preprocessing System (WPS).
4.2 Изучение подходов к редактированию типов природных и антропогенных ландшафтов в WPS.
4.3 Разработка программы для редактирования файлов данных природных ландшафтов.
4.4 Проведение численного эксперимента.
- 5. Дата выдачи задания:** 08.02.2018.

Научный руководитель

д-р геогр. наук, канд. физ.-мат. наук,
профессор кафедры СП

С.М. Абдуллаев

Задание принял к исполнению

В.В. Мокшанцев

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Анализ предметной области	7
1.1. Общие сведения о модели WRF ARW	7
1.2. Структура модели	8
2. РЕДАКТИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ.....	13
2.1. Задачи редактора ландшафтов	13
2.2. Способы редактирования.....	14
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ	15
4.1. Требования к разрабатываемой программе.....	15
4.2. Диаграмма вариантов использования	15
4.3. Спецификации вариантов использования	16
5. ТЕСТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ	22
5.1. Выбор средств разработки	22
5.2. Реализация программы.....	22
5.3. Функциональное тестирование	27
7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	29
7.1. Процесс работы с моделью WRF	29
7.2. Численный эксперимент	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
ЛИТЕРАТУРА.....	41
ПРИЛОЖЕНИЕ	45
Приложение 1.	45
Приложение 2.	48

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Математическое моделирование атмосферных процессов широко используется в практике прогнозирования погоды и климатических изменений. Неотъемлемой частью моделей погоды и климата являются глобальные данные о свойствах подстилающей поверхности. Эти данные используются в численных моделях для расчета обмена земной поверхности с атмосферой теплом, влагой и количеством движения.

Современные глобальные базы данных по свойствам подстилающей поверхности получены в основном с помощью спутниковых наблюдений и имеют различное пространственное разрешение, различаются по количеству классов ландшафтов и растительного покрова. В связи с наблюдаемым в последние десятилетия изменением климата и вследствие активной хозяйственной деятельности происходит значительное изменение ландшафтов и типов подстилающей поверхности, что необходимо учитывать при моделировании.

Для изучения последствий таких изменений в масштабе отдельных территорий и регионов, их влияния на локальный климат, прогнозирование влияния планируемой хозяйственной деятельности на ландшафты с использованием численного моделирования требуется возможность вносить изменения в характеристики подстилающей поверхности.

В качестве модели в численных экспериментах специалистами в области метеорологии и климатологии широко используется Weather Research and Forecasting Model (WRF). Модель разрабатывается сообществом научных организаций США, в том числе Национальным центром атмосферы и океана, национальным центром атмосферных исследований. Модель Weather Research and Forecasting представляет собой целое семейство численных моделей прогноза погоды, которые могут быть использованы как для прогнозирования состояния атмосферы, так и для научных исследований.

Модель представляет собой систему модулей: модуль подготовки начальных и граничных данных (WRF Preprocessing System), решающее ядро (Advanced Research WRF), модуль постпроцессинга (WRF Postprocessing System).

Основная часть модели реализована на языке Fortran с использованием библиотеки MPI. Модули для работы с данными написаны на языке C. Модель доступна в виде исходных кодов и докер образа.

В данной работе используется модель Advanced Research Weather Research and Forecasting (ARW) версии 3.4.

Модель WRF можно использовать не только для проведения анализа данных, но и в экспериментах. Для этого требуется правильным образом изменить входные данные для модели.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является создание редактора, который бы позволял произвести подготовку данных о свойствах подстилающей поверхности, классах ландшафтов, требующихся для запуска модуля программы WPS (WRF Processing System).

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- 1) изучение методической документации модуля WRF Preprocessing System (WPS);
- 2) изучение подходов к редактированию типов природных и антропогенных ландшафтов в WPS;
- 3) создание модели приложения;
- 4) проведение численного эксперимента.

Структура и объем работы

Дипломная работа состоит из введения, семи основных глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет 49 страниц; список литературы содержит 35 библиографических наименований.

Обзор работы

Введение состоит из 4-х частей: «Актуальность исследования», «Цель и задачи работы», «Структура и объем работы» и «Обзор работы».

Первая глава, «Анализ предметной области», содержит описание предметной области, а также существующие на сегодняшний день проблемы и обобщает существующие решения.

Вторая глава, «Редактирование природных и антропогенных ландшафтов», содержит описание задач требующих редактирования ландшафтов.

Третья глава, «Проектирование программы» содержит описание функционала, свойств и характеристик, которыми должна обладать разрабатываемая программа, а также описание средств, используемых при реализации программы.

Четвёртая глава, «Тестирование и реализация», содержит описание процесса разработки программы, а также набор тестов, проверяющих работоспособность основного функционала программы.

Пятая глава, «Экспериментальная часть», содержит описание процесса работы с моделью WRF, а также описание численного эксперимента.

В заключении описаны основные результаты, полученные при выполнении дипломной работы.

1. Анализ предметной области

1.1. Общие сведения о модели WRF ARW

Модель WRF (Weather Research and Forecasting Model) создана в результате сотрудничества ряда научных учреждений: National Center for Atmospheric Research (NCAR); Mesoscale and Microscale Meteorology laboratory (MMM); National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); National Centers for Environmental Predictions (NCEP); Forecast System Laboratory (FSL); Air Force Weather Agency (AFWA); Naval Research Laboratory (NRL) и др. организаций США [3, 23, 1, 17]. Отличительной особенностью WRF является то, что она является одновременно свободно распространяемой, открытой для общего пользования моделью, и в тоже время оперативной практической системой численного прогноза погоды. Это позволило объединить усилия официальных разработчиков и создать почти 40 тысячное сообщество пользователей из 160 стран света [22]. В частности, модель WRF используется для проведения региональных атмосферных исследований на Южном Урале [24, 27, 28, 29, 34].

Модель WRF, как и другие численные модели погоды, содержит динамическое ядро – численная схема решения системы гидродинамических уравнений свободной атмосферы и набор физических параметризаций – численных схем для замыкания системы гидродинамики (обмен движением и теплом с пограничным слоем атмосферы, излучение и др.) Для модели разработаны два динамических ядра – ARW (Advanced Research WRF) и NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model), каждое из которых представляет собой различные вычислительные системы, требующую отдельной установки и настройки. Наиболее распространена поддерживаемая NCAR система WRF-ARW [3, 23, 1]. Негидростатическое ядро NMM разработано NCEP и используется в системе прогноза ураганов [17].

На основе динамических ядер WRF создаются отдельные моделирующие системы, представляющие собой семейства модулей и программные дополнений к модели [3, 23, 1, 17, 22]. Например, моделирующая система

WRF-Chem предназначена для исследований переноса и трансформации химических примесей – важных элементов качества атмосферного воздуха над урбанизированными территориями. Основные программные дополнения к WRF:

- 1) WRF Chemistry (NCAR, UCAR: WRF-Chem) – дополнение используемое для моделирования рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере;
- 2) (Advanced) Hurricane WRF [21] - дополнение, используемое для моделирования движения ураганов;
- 3) Polar WRF (Polar Meteorology Group: The Polar WRF) - дополнение используемое для моделирования атмосферы полярных широт;
- 4) Urban WRF [9] - дополнение используемое для моделирования атмосферы в крупных городах;
- 5) Global WRF ARW [19] - дополнение используемое для моделирования глобальных атмосферных циркуляций.

Кроме того, для семейства WRF в открытом доступе представлен целый ряд файлов, содержащих параметризацию физических процессов. В США модель WRF используется для создания оперативного прогноза. При прогнозировании учитываются данные глобальной прогностической модели GFS (Global Forecast System), которые задают начальные и граничные условия (National Weather Service, GFS home; NOAA: GFS).

1.2. Структура модели

Структура модели подробно описана в методических руководствах [3, 17, 19, 22, 23], поэтому здесь приведены лишь сведения необходимые для понимания сделанной нами работы. Модель реализована в виде программного кода, написанного на различных языках программирования и устанавливаемого на ОС Linux. При необходимости, исследователем могут быть внесены изменения в исходный код. Коды могут выполняться в последовательном и параллельном режиме (поддержка MPI). Модель WRF со-

стоит из набора взаимосвязанных программ, которые работают поочерёдно. Каждая программа генерирует наборы данных, которые используются в качестве исходных данных для другой программы.

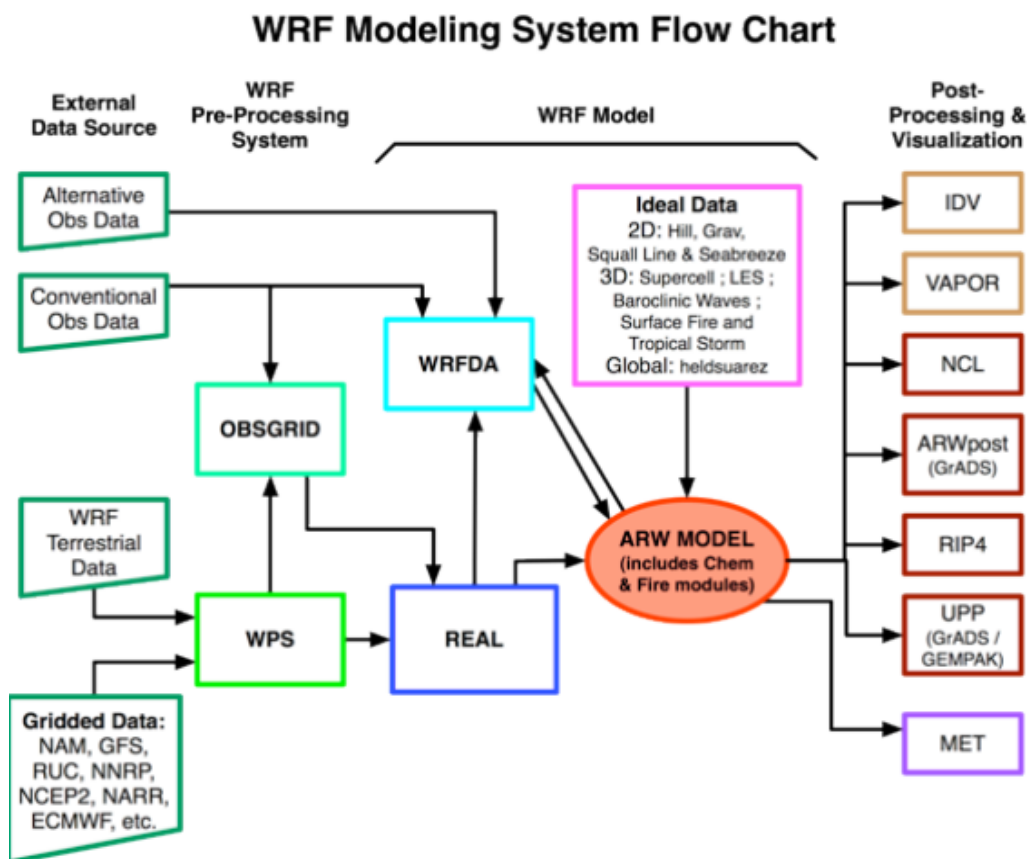


Рис. 1. Структура модели WRF согласно [3, 23, 1, 17]

Основными частями модели (рис.1) являются:

1. программа WPS (WRF Preprocessing System) – эта программа используется для моделирования реальных данных. Её функции:
 - 1) определение имитационного домена;
 - 2) интерполяция наземных данных на область моделирования; для географической привязки модели WRF (выбор области исследования, учет рельефа и распределения категорий землепользования подстилающей поверхности) используются глобальные топографические данные различного разрешения – от одного градуса до 30 секунд;

3) учет и интерполяция метеорологических данных с другой модели на области моделирования и координаты модели.

2. программа WRFDA – эта программа является необязательной, но может использоваться для восприятия наблюдений в интерполированных анализы, созданные WPS. Она также может использоваться для обновления начальных условий модели WRF когда модель WRF запускается в режиме циклирования.

3. программа REAL – эта программа отвечает за генерацию начальных и граничных условий для WRF-NMM (wrf.exe). Основная часть начальных данных предоставляются программой WPS. Некоторые переменные определяются/переопределяются с помощью функции `real_nmm` подпрограмм.

4. `obsgrid` – эта программа используется для проведения корректировки значений, получаемых на выходе программы WPS. Для этого используется один из четырёх методов объективного анализа, реализованных в программе:

1) `cressman Scheme` – использование данной схемы при анализе ветра и относительной влажности (поля, сильно деформированные ветром) при уровнях давления в радиусе стандартного схемы Крессмана удлиняются в эллипсы, ориентированные вдоль потока. Чем сильнее ветер, тем больше эксцентриситет эллипсов. Эта схема сводится к круговой схеме Крессмана в условиях низкого ветра;

2) `ellipse Scheme` (Многоквадратичная схема) – использование данной схемы при анализе ветра и относительной влажности (поля, сильно деформированные ветром) при определённом уровне давления, круги из стандартной схемы Крессмана удлиняются в эллипсы, ориентированные вдоль потока. Чем сильнее ветер, тем больше эксцентриситет эллипсов. Эта схема близка к круговой схеме Крессмана в условиях низкого ветра;

3) `banana Scheme` - использование данной схемы при анализе ветров и относительной влажности при уровнях давления в радиусе стандартного

Схема Крессмана удлиняется в направлении потока и изгибается вдоль линий потока. В результате получается банановая форма. Эта схема сводится к схеме эллипса при прямом потоке и к стандартной схеме Крессмана в условиях низкого ветра;

4) *multiquadric scheme* - многоквадратичная схема использует гиперболоидные радиальные базовые функции для выполнения задачи анализ.

Остановимся на работе комплекса программы WPS – к ней пользователь обращается на первом этапе работы с моделью WRF. WPS используется для преобразования двух типов данных: статических (ландшафт, землепользование и типы почв) и динамических (метеорологические данные из глобальных моделей таких как GFS или систем ассимиляции данных, таких как AGRMET и др. к виду понятному программе REAL (рис. 2).

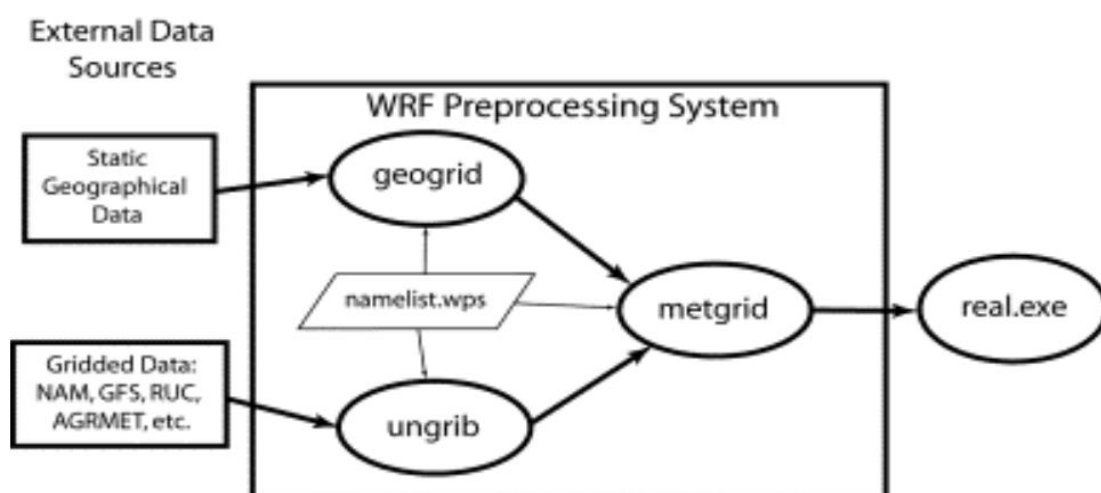


Рис. 2. Структура модуля WPS [3, 23, 1, 17, 22]

Пользователь подаёт на вход программе *geogrid* данные о ландшафтах и рельефе, а на выходе получает набор файлов с физическими параметрами, определяющими домены. Программе *ungrid* подаются на вход упакованные данные о погодных условиях в виде набора файлов в формате GRIB [30]. Программа *ungrid* обрабатывает и распаковывает данные. Программе *metgrid* подаются на вход результаты работы программ *geogrid* и

ungrib. На выходе программы metgrid формируется набор данных для дальнейшего использования в рамках модели.

Данные о ландшафте и погодные данные, могут быть изменены пользователем для проведения экспериментов. Для экспериментов с WRF есть возможность использовать вложенные в горизонтальной плоскости сетки (в вертикальной плоскости области целиком соответствуют друг другу). Благодаря этому WRF может использоваться при исследованиях атмосферных явлений в масштабах от сотен метров до тысяч километров, для исследования возможности применения различных схем параметризации и для сравнения с данными наблюдений [22, 23, 11, 12, 34, 32, 24, 33, 25, 26, 8, 4, 27, 13, 28, 29, 5, 2, 35, 31, 14, 6, 10, 9]. Примером таких исследований могут служить исследования пограничного слоя атмосферы над городом Челябинском и его окрестностями проводимые сотрудниками Южно-Уральского государственного университета О. Ю. Ленской и С.М. Абдуллаева [24, 27, 28, 29, 34]. Настоящая работа представляет развитие этих работ.

2. РЕДАКТИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

2.1. Задачи редактора ландшафтов

Формирование природного ландшафта происходит под влиянием множества факторов. Одним из этих факторов является макроклимат [25]. Под его влиянием происходит формирование системы природных (ландшафтных) зон на земной поверхности. В то время как макроклимат оказывает влияние на формирование ландшафтных зон, ландшафт оказывает влияние на формирование зонального климата (мезоклимата). Степень участия того или иного компонента ландшафта в формировании зонального климата (мезоклимата) зависит от типа ландшафта. Данный тип климата формируется несколькими небольшими территориями с похожими природными условиями. Микроклимат формируется внутри конкретного участка ландшафта и трактуется как режим погоды, установившийся на его небольшой части.

В современном мире человек оказывает существенное влияние на природные ландшафты, влияя тем самым на микро - и мезоклимат. Примерами такого влияния является вырубка лесов, строительство производственных предприятий, рост городов, создание сельскохозяйственных площадей. Последствия изменения ландшафта могут иметь различный масштаб. Они могут быть как незаметны, так и опасны для жизни людей. Поиск и прогнозирование таких последствий являются приоритетными направлениями в задачах изменения ландшафтов.

Задачи редактора ландшафтов. Поверхность планеты представляет собой различного вида природно-антропогенные ландшафты. Прогнозирование последствий результатов влияния хозяйственной деятельности на природно-антропогенные ландшафты является целью многих современных исследований с использованием WRF. В таких исследованиях, как правило, производятся изменения типов ландшафтов и проводятся численные эксперименты, позволяющие обнаружить влияния этих изменений на при-

земный и пограничный слой атмосферы [22, 23, 15, 12, 34, 32, 24, 33, 25, 26, 8, 4, 27, 13, 28, 29, 5, 2, 35, 31, 14, 6, 10, 9].

Задачами создаваемого редактора ландшафтов являются:

Обеспечение возможности изменения типов ландшафтов в базе данных программы WPS (WRF Preprocessing System);

Обеспечение проведения численных экспериментов с моделью WRF.

2.2. Способы редактирования

Данные о ландшафте хранятся в виде двух файлов: бинарного файла и файла с метаданными. Бинарный файл содержит информацию о цвете каждой точки изображения. Файл с метаданными содержит набор параметров, определяющих как будет восприниматься ландшафт моделью WRF.

Редактирование данных о ландшафте сводится к преобразованию бинарного файла в изображение и его открытию в соответствующем графическом редакторе.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ

4.1. Требования к разрабатываемой программе

После проведения анализа существующих программных решений, предоставляющих возможности редактирования природных ландшафтов (GrADS) было решено разработать программу, нацеленную на подготовку данных, необходимых для проведения исследований с использованием модели WRF. Эта программа позволит пользователю модифицировать ландшафт, подаваемый на вход программе предварительной обработки WPS (WRF Processing System), а также метаданные, определяющие свойства изменяемого ландшафта.

Программа должна работать с различными форматами входных данных и предоставлять пользователю интуитивно понятный интерфейс для поиска и загрузки нужного участка ландшафта. Вместе с данными о ландшафте должна обеспечиваться загрузка метаданных, определяющих свойства открываемого ландшафта. Изменяемые данные должны проходить процесс валидации для своевременного обнаружения и ликвидации возможных ошибок.

Программа должна уметь вычислять географические координаты точки загруженного ландшафта над которой находится курсор мыши.

Все обработанные данные должны визуализироваться и быть доступны для изменения.

Важным требованием к разрабатываемому проекту является представление данных в простом и понятном пользователю виде.

4.2. Диаграмма вариантов использования

С учетом требований, представляемых к программе, была разработана диаграмма вариантов использования, изображенная на рис. 3.

Актер «Пользователь» – это пользователь системы, занимающийся изменением файлов данных, передаваемых модулю WPS программе geogrid модели WRF в качестве входных данных.

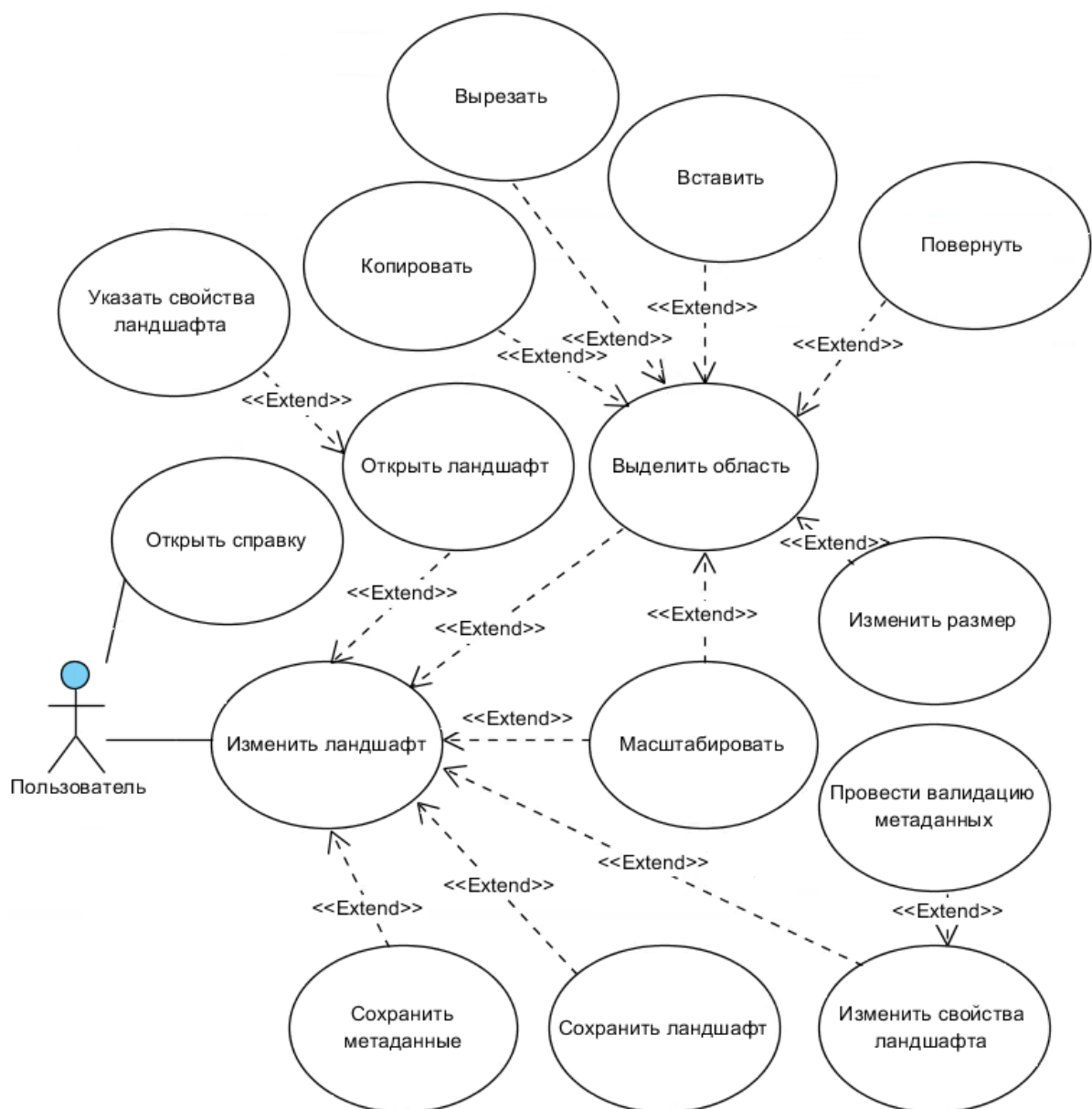


Рис. 3. Диаграмма вариантов использования приложения

4.3. Спецификации вариантов использования

Вариант использования «Открыть справку»

Краткое описание: распаковка html файла со справочной информацией из jar архива, а затем открытие в браузере по умолчанию.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Нет.

Основной сценарий.

1. Вариант использования запускается Пользователем при выборе пункта меню «Справка» находящегося в разделе «Помощь».

2. Из jar архива распаковывается html файл, содержащий справочную информацию.

3. Файл помечается как временный.

4. Файл открывается в браузере по умолчанию.

Постусловие: в браузере по умолчанию создана новая вкладка, в которой открыт файл со справочной информацией.

Вариант использования «Изменить ландшафт»

Краткое описание: Редактирование графического изображения ландшафта.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Нет.

Основной сценарий.

1. Вариант использования запускается при выборе пользователем инструмента для работы с графикой. Инструментами могут быть: карандаш, кисть, ластик, и т.д.

Постусловие: Пользователь выбрал инструмент и приступил к изменению ландшафта.

Расширяющий вариант использования «Открыть ландшафт»

Краткое описание: Получение графического изображения ландшафта из файла и метаданных в текстовом виде из соответствующего index файла.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Нет.

Основной сценарий.

1. Вариант использования запускается пользователем при выборе пункта меню «Открыть» находящегося в разделе «Файл».

2. Открывается окно выбора файла.

3. Пользователь выбирает файл.

4. Пользователь подтверждает свой выбор нажатием кнопки «Open».

5. Файл с данными о ландшафте и файл с метаданными открываются программой.

Постусловие: Получено графическое отображение файла с ландшафтом и соответствующие ему метаданные.

Расширяющий вариант использования «Указать свойства ландшафта»

Краткое описание: Получение графического изображения ландшафта из файла и метаданных в текстовом виде из соответствующего index файла.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Пользователь находится в окне выбора файла.

Основной сценарий.

1. Вариант использования запускается пользователем при выборе пункта меню «Открыть файл с точкой...» находящегося в разделе «Файл».

2. Пользователь заполняет поля. Обязательными для заполнения являются поля: широта, долгота и путь до каталога, в котором будет происходить поиск.

3. Пользователь нажимает кнопку «Открыть».

4. В случае успешного поиска файл с данными о ландшафте и файл с метаданными открываются программой.

Постусловие: Получено графическое отображение файла с ландшафтом и соответствующие ему метаданные или сообщение об отсутствии файла с заданными характеристиками.

Расширяющий вариант использования «Изменить свойства ландшафта»

Краткое описание: Редактирование файла метаданных.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Нет.

Основной сценарий.

1. Вариант использования запускается пользователем при открытии ландшафта.

2. В правой части рабочей области появляется панель, содержащая текстовое поле, в котором отображается содержимое файла с метаданными.

Постусловие: Получен набор параметров открытого ландшафта.

Расширяющий вариант использования «Провести валидацию метаданных»

Краткое описание: Синтаксический анализ текста, соответствующего метаданным.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Пользователь переходит на вкладку «Прочее».

1. Вариант использования запускается пользователем при нажатии на кнопку «Проверка метаданных».

2. Некорректные записи визуально выделяются.

Постусловие: Цвет шрифта всех некорректных записей изменён на красный.

Расширяющий вариант использования «Выделить область»

Краткое описание: Пользователь выделяет часть изображения для дальнейшего взаимодействия.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Пользователь переходит на вкладку «Главная».

1. Вариант использования запускается пользователем при нажатии на кнопку «Выделить».

2. Пользователь нажимает правую клавишу мыши в пределах изображения.

3. Пользователь перемещает указатель мыши в новое положение в пределах изображения.

4. Пользователь отпускает правую клавишу мыши.

5. Часть изображения выделена.

Постусловие: поверх изображения ландшафта прорисован прямоугольник, стороны которого прорисованы штрих - пунктирной линией.

Расширяющий вариант использования «Масштабировать»

Краткое описание: Пользователь пропорционально изменяет размер изображения.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Пользователь переходит на вкладку «Вид».

1. Вариант использования запускается пользователем при нажатии на кнопку «Увеличить» или кнопку «Уменьшить».

2. В зависимости от нажатой кнопки изображение увеличивается в размере или уменьшается.

Постусловие: масштаб изображения изменился.

Расширяющий вариант использования «Изменить размер»

Краткое описание: Пользователь пропорционально изменяет размер изображения или выделенной области.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Пользователь переходит на вкладку «Главная».

1. Вариант использования запускается пользователем при нажатии на кнопку «Размер».

2. Пользователь указывает новый размер изображения по горизонтали и вертикали.

3. Пользователь подтверждает свой выбор нажатием кнопки «ок».

Постусловие: размер выделенной области изменился.

Расширяющий вариант использования «Сохранить ландшафт»

Краткое описание: Пользователь инициировал процесс сохранения ландшафта.

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Пользователь переходит на вкладку «Главная».

1. Вариант использования запускается пользователем при выборе пункта меню «Сохранить» находящегося в разделе «Файл».

2. Программа инициирует процесс сохранения данных в файл. Схема работы функции сохранения ландшафта показана на рис. 6.

Постусловие: Появилось оповещение об успехе или ошибке сохранения файла.

Расширяющий вариант использования «Повернуть»

Краткое описание: Пользователь выделил область и нажал кнопку «Поворот».

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Пользователь переходит на вкладку «Главная».

1. Вариант использования запускается пользователем при нажатии кнопки «Поворот», которая находится на вкладке «Главная».

Постусловие: Выделенное изображение повернуто на 90°.

Расширяющий вариант использования «Копировать»

Краткое описание: Пользователь выделил область вызвал контекстное меню и выбрал пункт «Копировать».

Актеры: Пользователь.

Предусловие: Открыт ландшафт.

1. Вариант использования запускается пользователем при нажатии правой клавиши мыши в пределах окна редактирования ландшафта и выборе пункта контекстного меню «Копировать».

2. Изображение копируется в системный буфер.

Постусловие: Изображение сохранено в системном буфере

5. ТЕСТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ

5.1. Выбор средств разработки

В качестве языка программирования был выбран язык программирования Java [11, 13]. Выбранный язык соответствует всем требованиям, предъявляемым к языку программирования, в рамках данной работы. Преимуществом Java является то, что программы, написанные на данном языке, могут быть запущены на различных операционных системах. Так же Java предоставляет широкие возможности по работе с графикой [13]. Программа разрабатывалась в соответствии парадигме объектно-ориентированного программирования. В качестве интегрированной среды разработки использовалась IDE Eclipse Oxygen.

5.2. Реализация программы

Реализованная программа представляет из себя графический редактор с функционалом, ориентированным на работу с графическим представлением ландшафтов. Функционал программы не ограничивается работой с графической составляющей ландшафта. Программа предоставляет возможность изменения и валидации метаданных ландшафта с которым в данный момент времени происходит работа.

Ландшафт и метаданные хранятся в виде файлов. Файлы с данными о ландшафте группируются вокруг файлов с метаданными в которых описываются их характеристики. Файлы определённым образом распределены по каталогам. В одном каталоге может находится не более одного файла с метаданными. Каталоги именуются в зависимости от того какие характеристики имеет набор ландшафтов, хранящийся в них.

Работа с файлами подразумевает выполнение операций поиска, открытия и сохранения файлов с данными о ландшафте, а также открытие и сохранение соответствующих файлов с метаданными.

Алгоритм открытия файла с данными о ландшафте представлен на рис. 4.

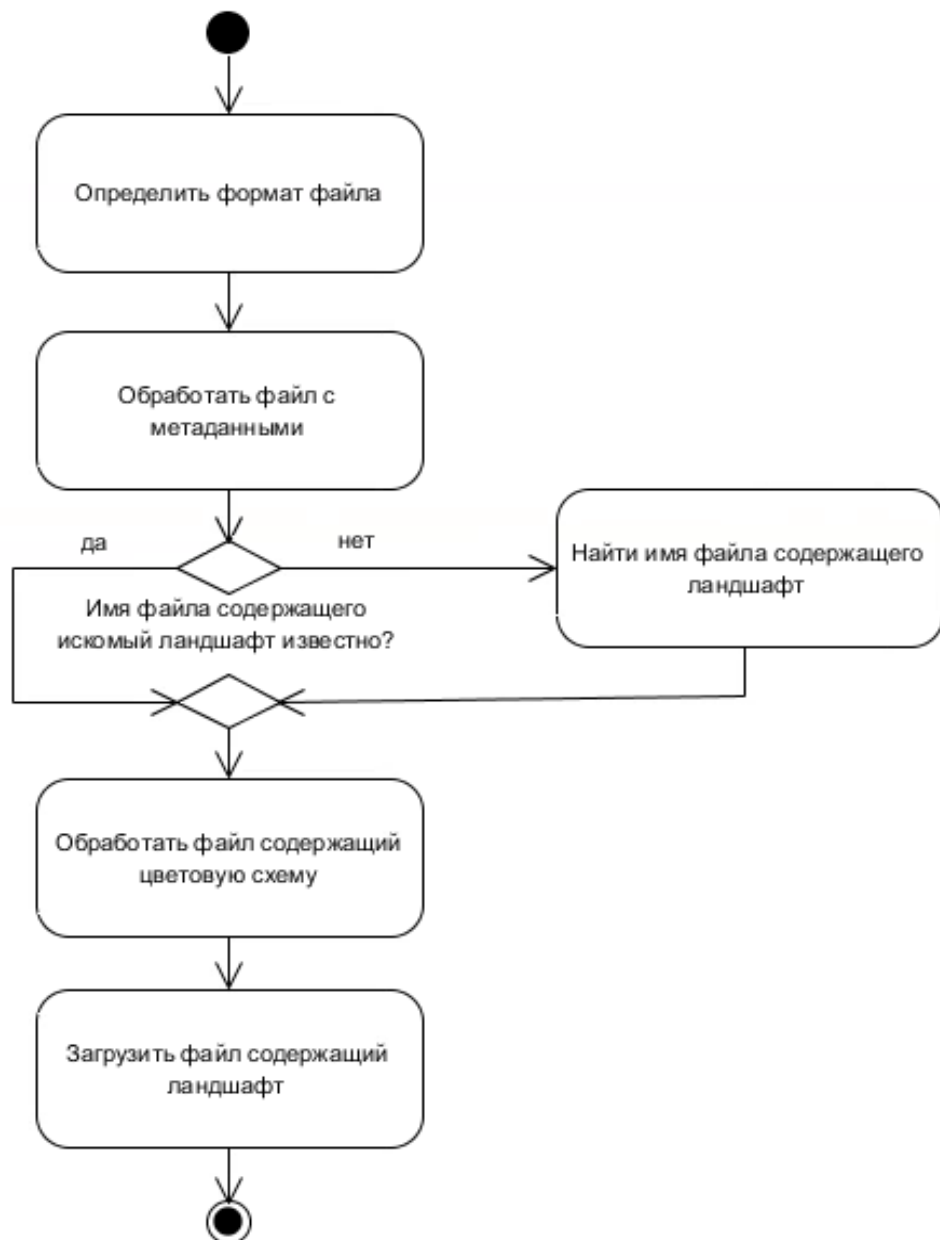


Рис. 4. Схема работы функции открытия ландшафта

Действие «Определить формат файла» – программа определяет какой тип файла пытается открыть пользователь.

Действие «Обработать файл с метаданными» – программа открывает index файл, считывает его содержимое в текстовом виде, затем выполняет парсинг текста и сохраняет полученные результаты.

Действие «Найти имя файла, содержащего ландшафт» – выполняется поиск имени файла, содержащего ландшафт, в котором находится указан-

ная пользователем точка. Схема работы функции поиска файла, содержащего ландшафт, в котором находится указанная пользователем точка отображена на рис. 5.

Действие «Обработать файл, содержащий цветовую схему» – выполняется распаковка файла, содержащего цветовую схему из jar архива в виде временного файла. Затем считывается информация о цветах.

Действие «Загрузить файл, содержащий ландшафт» – выполняется считывание файла блоками по n байт. Где n - число равное значению параметра `wordsize`, который содержится в `index` файле.



Рис. 5. Схема работы функции поиска файла, содержащего ландшафт, в котором находится указанная пользователем точка

Действие «Запросить у пользователя ввод параметров поиска» – открывается окно с текстовыми полями. Поля «широта», «долгота», «корневой каталог» требуют обязательного заполнения. Поле «пространственное разрешение» не требует обязательного заполнения.

Действие «Найти необработанный index файл» – выполняется поиск index файла, который ещё не был найден в корневом каталоге и всех его подкаталогах.

Действие «Рассчитать сдвиг точки» – выполняется расчет сдвига точки относительно нуля.

При расчете сдвига используются следующие формулы:

$$X = (Lon + 180) * title_x / (title_x * scale_factor + 0.5);$$

$$Y = (Lat + 90) * title_y / (title_y * scale_factor + 0.5);$$

где:

Lon – долгота;

Lat – широта;

title_x – ширина участка ландшафта;

title_y – высота участка ландшафта;

scale_factor – пространственное разрешение ландшафта;

X – количество километров по оси x от точки соответствующей нулю градусов до точки, соответствующей нижнему левому углу участка ландшафта;

Y – Количество километров по оси y от точки соответствующей нулю градусов до точки, соответствующей нижнему левому углу участка ландшафта.

Действие «Найти файл в каталоге, в котором был найден index файл» – выполняется поиск файла, содержащего информацию о ландшафте. Поиск выполняется в пределах текущего каталога. Поиск происходит на основе параметров, находящихся в index файле.

Алгоритм сохранения ландшафта представлен на рис. 6.

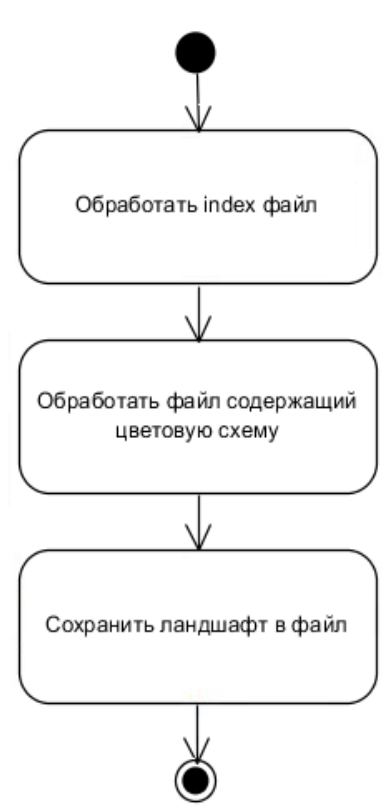


Рис. 6. Схема работы функции сохранения ландшафта

Действие «Обработать index файл» – выполняется загрузка параметров ландшафта из index файла.

Действие «Обработать файл, содержащий цветовую схему» – выполняется распаковка файла, содержащего цветовую схему из jar архива в виде временного файла. Затем считывается информация о цветах.

Действие «Сохранить ландшафт в файл» – выполняется сохранение ландшафта в файл.

Файлы именуются посредством вычисления количества километров от точки с широтой и долготой равными нулю до левой нижней и правой верхней точек рассматриваемого участка. Каждое число в имени файлов состоит из пяти цифр. Если число содержит менее пяти значащих цифр, то слева добавляются нули до тех пор, пока цифр в числе не станет пять. Первые два числа в имени файла разделяются знаком тире, второе и третье число разделяются точкой, третье и четвертое знаком тире.

Первое число в имени файла соответствует количеству километров

по оси x от точки соответствующей нулю градусов до точки, соответствующей нижнему левому углу участка ландшафта.

Второе число в имени файла соответствует количеству километров по оси x от точки соответствующей нулю градусов до точки, соответствующей нижнему левому углу участка ландшафта плюс ширина участка ландшафта. Третье число в имени файла соответствует количеству километров по оси y от точки соответствующей нулю градусов до точки, соответствующей нижнему левому углу участка ландшафта плюс высота участка ландшафта.

5.3. Функциональное тестирование

Было произведено функциональное тестирование с целью проверки реализуемости функциональных требований относительно поставленной задачи.

Тест № 1. Загрузка изображения.

Входные данные: пользователь открывает изображение ландшафта в программе.

Ожидаемый результат: Изображение загружено и прорисовано на экране.

Полученный результат: Изображение прорисовано на экране в поле редактирования.

Тест пройден успешно.

Тест № 2. Добавление нового элемента ландшафта - озеро.

Входные данные: пользователь выбирает тип местности и использует инструмент «Карандаш» для выделения границ озера. Затем пользователь использует инструмент «Заливка» для закрашивания выделенного участка.

Ожидаемый результат: Добавлено изображение озера.

Полученный результат: Тип местности изменился.

Тест пройден успешно.

Тест № 3. Сохранение изображения ландшафта.

Входные данные: Пользователь тип местности и использует инструмент «Сохранить»

Ожидаемый результат: Оповещение об успешном сохранении файла.

Полученный результат: Получено оповещение об успешном сохранении файла.

Тест пройден успешно.

Тест № 4. Валидация метаданных.

Входные данные: Пользователь переходит на вкладку «Прочее» и нажимает кнопку «Валидация метаданных».

Ожидаемый результат: Текст подсвечен зелёным цветом

Полученный результат: Текст подсвечен зелёным цветом, что соответствует успешному прохождению процесса валидации.

Тест пройден успешно.

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

7.1. Процесс работы с моделью WRF

Процесс работы с моделью можно подразделить на четыре этапа.

1. Подготовка начальных данных.
2. Распаковка данных и определение начальных условий.
3. Инициализация и запуск модели.
4. Обработка результатов.

На первом этапе модифицируется ландшафт. Откроем файл с данными о ландшафте Челябинской области. Ландшафт открытый в редакторе представлен на рис. 7.

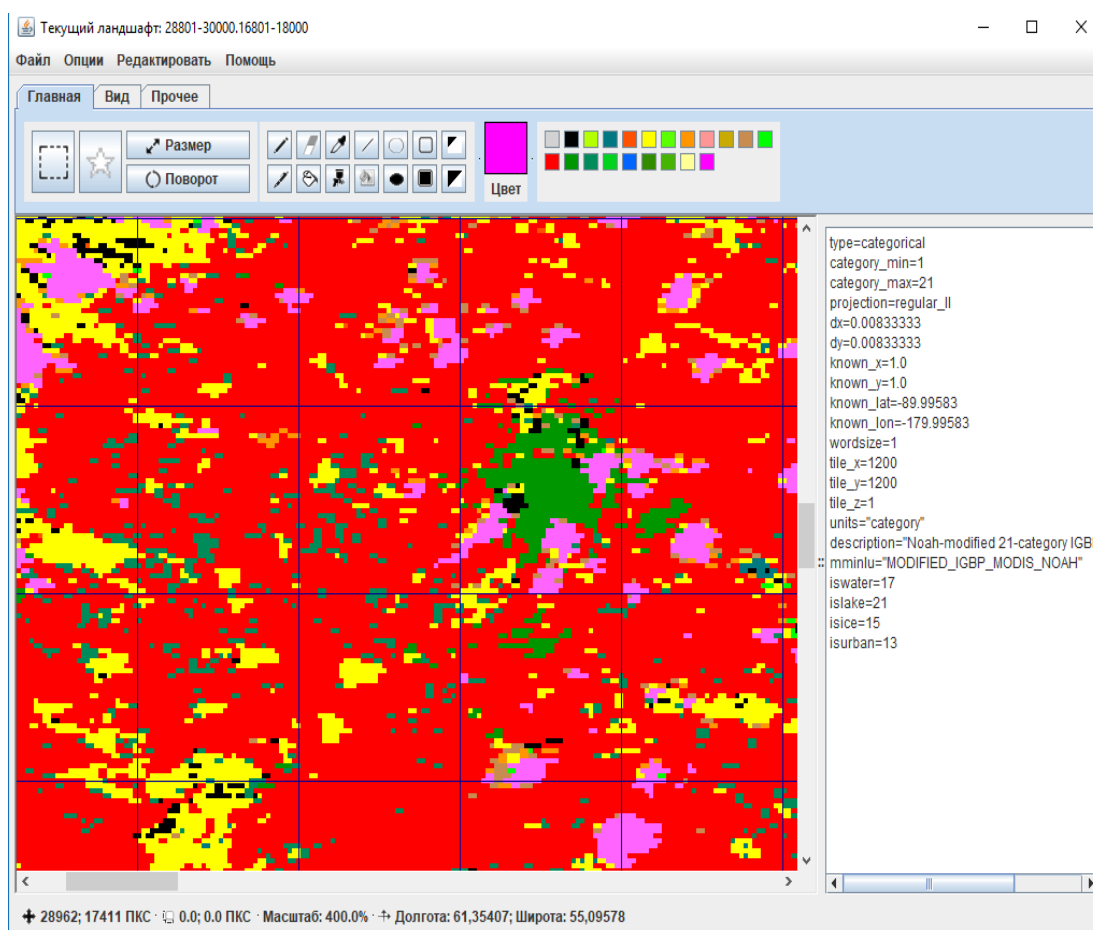


Рис. 7. Ландшафт, открытый в редакторе

Изменим ландшафт добавив новый элемент «Озеро». Измененный ландшафт представлен на рис. 8.

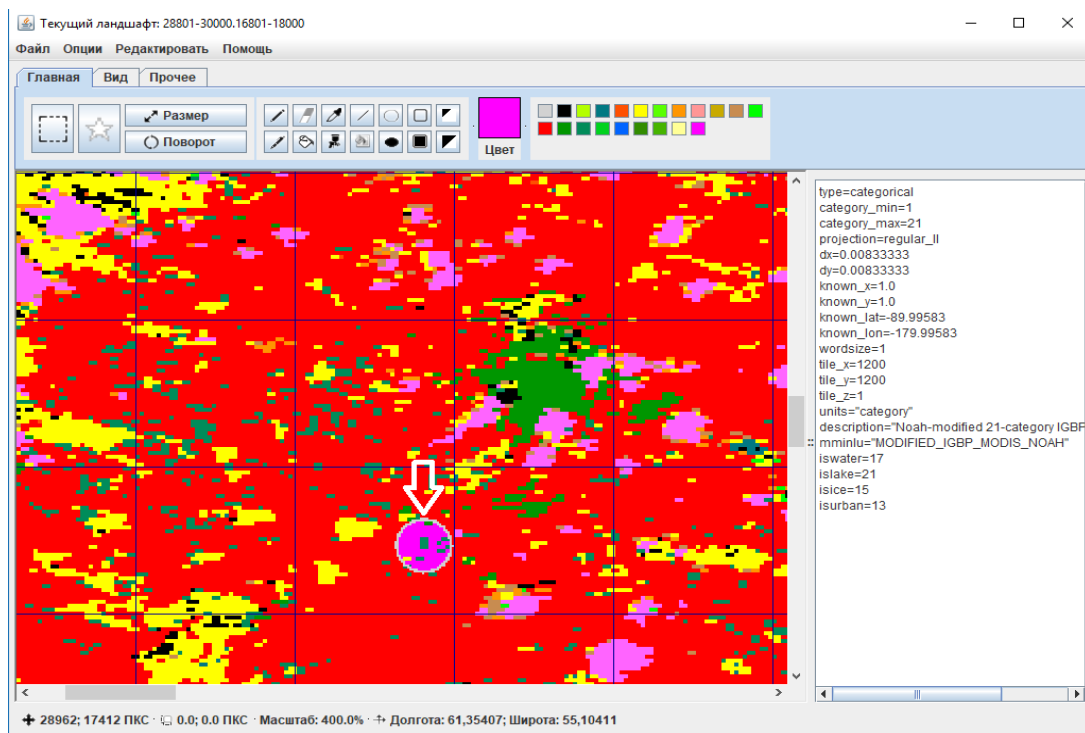


Рис. 8. Изменённый ландшафт

На втором этапе создаётся домен, распаковываются метеоданные и задаются расчётные области. Для выполнения вышеперечисленных действий воспользуемся программой WRF Domain Wizard. Данная программа позволяет провести весь процесс обработки исходных данных и сыормировать

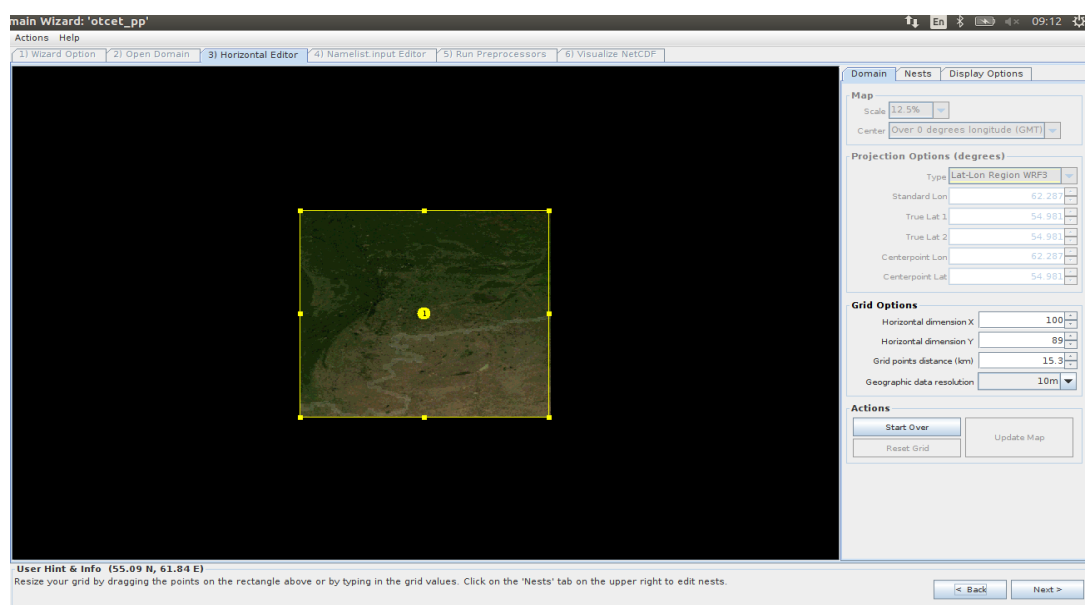


Рис. 9. Окно создания нового домена в программе WRF Domain Wizard

Домен определяется шириной и длиной нижней левой и правой верхней точек области. Процесс создания нового участка ландшафта изображён на рис. 9.

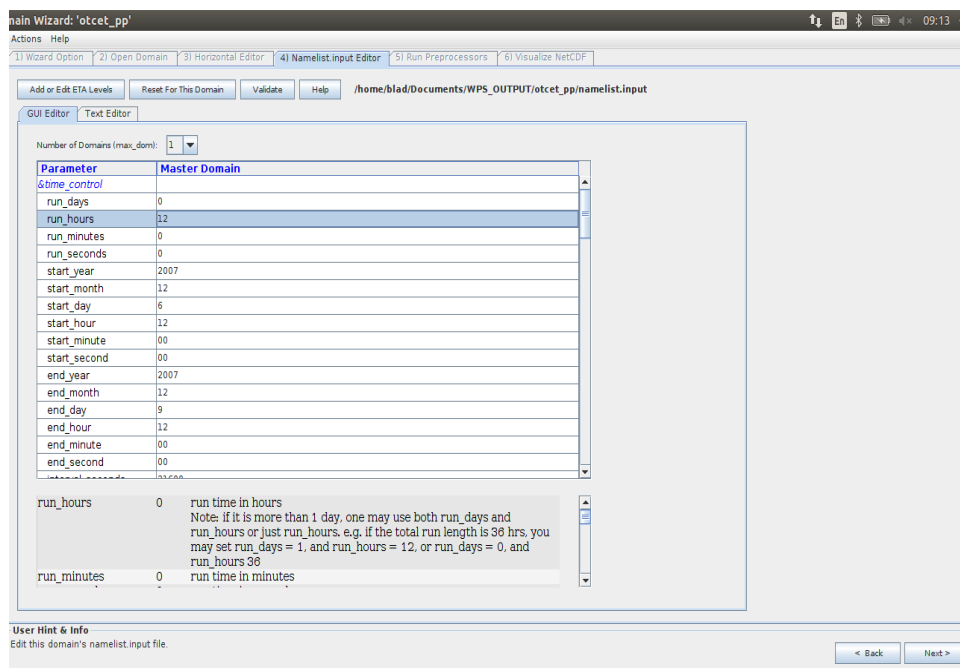


Рис. 10. Окно редактирования файла namelist.input в программе WRF Domain Wizard

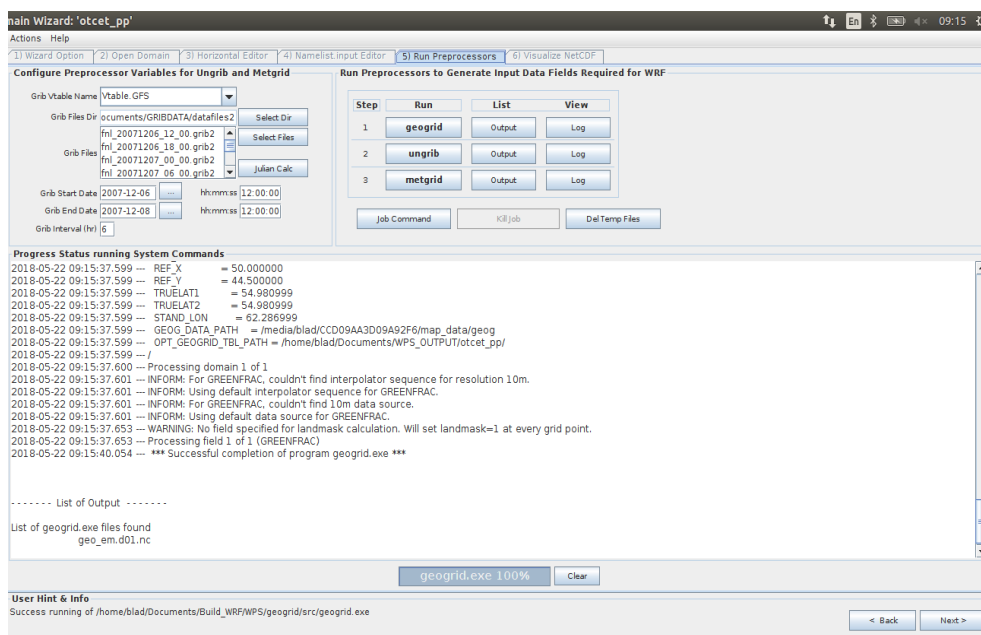


Рис. 11. Окно работы с программой geogrid.exe в программе WRF Domain Wizard

После создания домена определим его свойства и сохраним в файл `namelist.input`. Файл `namelist.input` содержит набор параметров, которые определяют, как программы модуля WRF будут работать с созданным доменом. Описание параметров файла `namelist.input` представлено в приложении 1.

Далее воспользуемся программой `geogrid.exe` для определения имитационного домена и проведения интерполяции различных наземных наборов данных в модельные сетки. Результат работы программы представлен на рис. 11.

Визуализируем результаты работы программы `geogrid.exe` при помощи программы GrADS. Визуализированный участок ландшафта представлен на рис. 12.

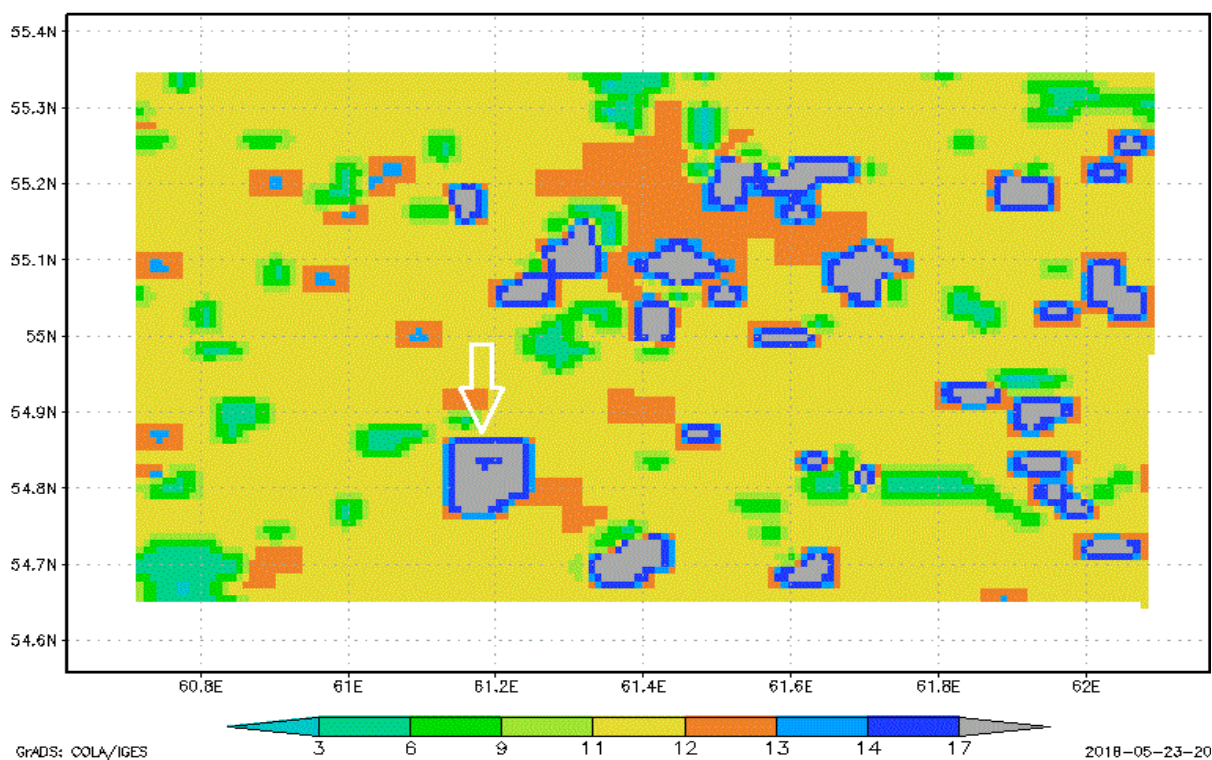


Рис. 12. Визуализированный участок ландшафта после добавления озера

Далее воспользуемся программой для распаковки GRIB файлов, содержащих информацию об исторических и прогнозируемых погодных данных. Результат работы программы `ungrib.exe` представлен на рис. 13.

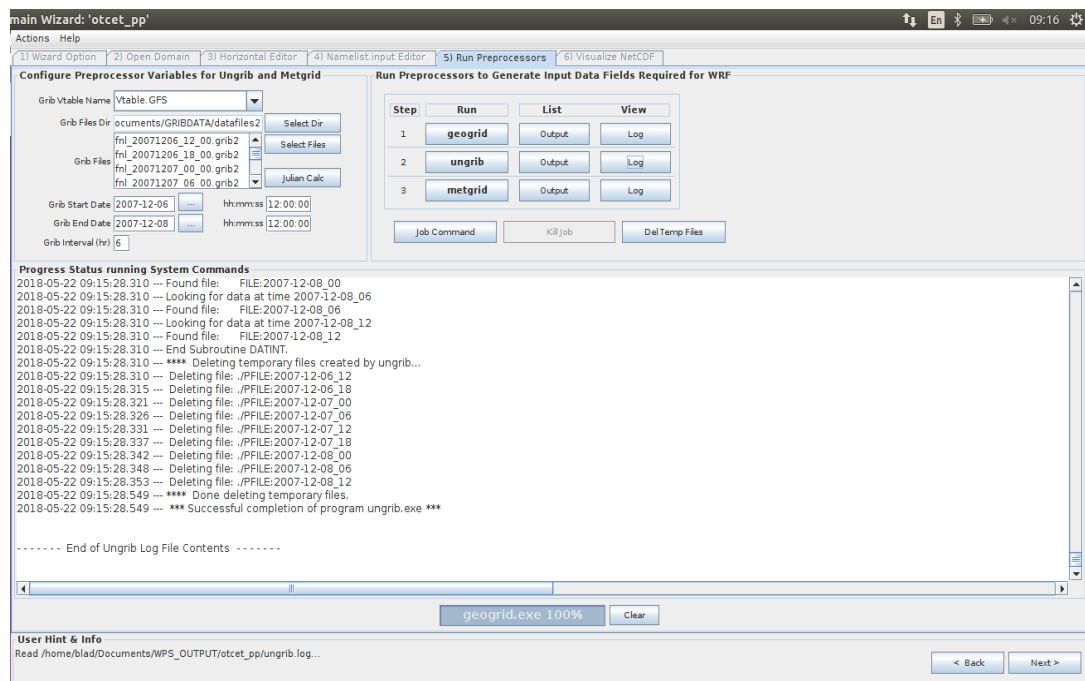


Рис. 13. Окно работы с программой ungrib.exe в программе WRF Domain Wizard

На последнем шаге данного этапа воспользуемся программой metgrid.exe для получения расчётных областей. Результат работы программы представлен на рис. 14.

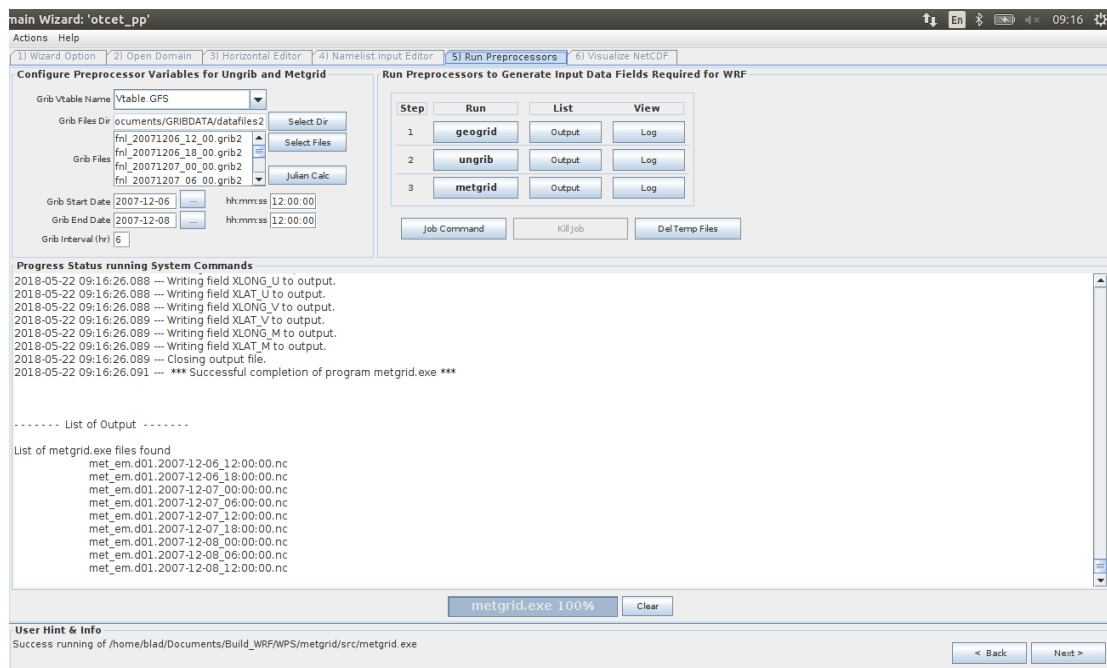


Рис. 14. Окно работы с программой metgrids.exe в программе WRF Domain Wizard

На третьем этапе задаются начальные условия и запускается расчет модели.

Зададим начальные условия используя программу real.exe. Результат работы программы представлен на рис. 15.

```
Domain 1: Current date being processed: 2007-12-08_12:00:00.0000, which is loop # 9 out of 9
configflags%julyr, %julday, %gmt:      2007      342    12.00000000
metgrid input_wrf.F first_date_input = 2007-12-08_12:00:00
metgrid input_wrf.F first_date_nml = 2007-12-06_12:00:00
d01 2007-12-08_12:00:00 Timing for input      0 s.
d01 2007-12-08_12:00:00      flag_soil_layers read from met_em file is 1
d01 2007-12-08_12:00:00 Turning off use of MAX WIND level data in vertical interpolation
d01 2007-12-08_12:00:00 Turning off use of TROPOPAUSE level data in vertical interpolation
Using sfcprs3 to compute psfc
d01 2007-12-08_12:00:00      flag value of flag_qnwfa is      0
d01 2007-12-08_12:00:00 No average surface temperature for use with inland lakes
d01 2007-12-08_12:00:00 Soil temperature closest to 30.00 at level 25
d01 2007-12-08_12:00:00 forcing artificial silty clay loam at 947 points, out of 9045
LAND CHANGE =      0
WATER CHANGE =      0
d01 2007-12-08_12:00:00 Total pre number of sea ice location changes (water to land) = 1131
d01 2007-12-08_12:00:00 Timing for processing      1 s.
d01 2007-12-08_12:00:00 Timing for output      0 s.
d01 2007-12-08_12:00:00 Timing for loop # 9 =      1 s.
d01 2007-12-08_12:00:00 real_em: SUCCESS COMPLETE REAL_EM INIT
```

Рис. 15. Выполнение программы real.exe

Далее запустим программу WRF.exe которая произведёт вычисления и сформирует результат в виде файла в формате netCDF.

На четвёртом этапе обрабатываются результаты работы модели, полученные на третьем этапе. Как правило для этих целей используется одна из программ таких как: NCL, IDV, VAPOR, WRWpost (GrADS), RIP4, UPP (GrADS/GEMPAK), MET.

Для примера визуализируем полученные результаты в виде карты поверхностных температур. Для визуализации воспользуемся NCL (Ncar Command Language). Визуализированная карта поверхностных температур представлена на рис. 16.

Текст скрипта визуализации представлен в приложении 2.

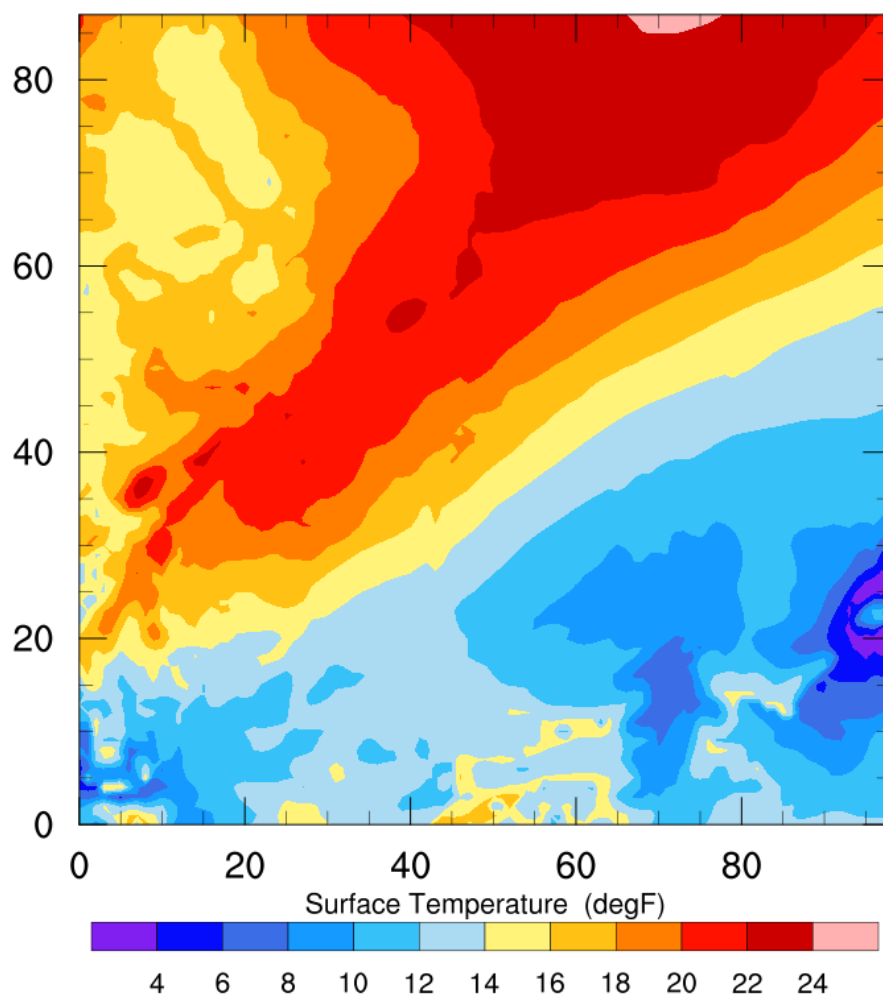


Рис. 16. Карта поверхностных температур для момента времени 06.12.2007 12:00:00

7.2. Численный эксперимент

Для проверки, как реагируют некоторые характеристики приземного слоя атмосферы после изменения типа ландшафта, проведен численный эксперимент с помощью модели WRF.

Фрагмент ландшафтов территории, который содержится в базе геоданных, и визуализированный в Редакторе показан на рис. 17. Зеленый цвет соответствует урбанизированным территориям, розовый – озера, желтый – лесные массивы. В типы ландшафтов внесено изменение: в прямоугольной области размером $\sim 5 \times 5$ км и центром в 54,92 с.ш. 61,21 в.д. произведена замена залесенной местности на урбанизированную, застроенную территорию. Такому типу ландшафтов в базе геоданных соответ-

ствуется антропогенно измененный участок природной поверхности земли, на котором могут располагаться здания, корпуса промышленных предприятий, дороги и т.п. Таким образом, к юго-востоку от города Челябинска появилась – урбанизированная территория, аналогичная по физическим свойствам территории Челябинска.

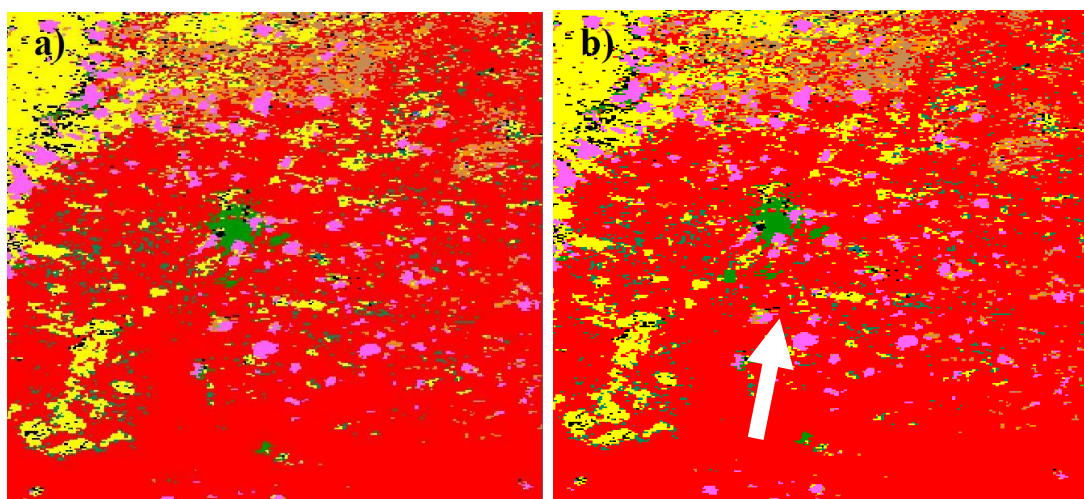


Рис.17. Изображение ландшафтов Южного Урала в Редакторе:
а) исходные ландшафты; б) трансформированные ландшафты.

Основные типы ландшафтов, визуализированные после расчетов с моделью WRF представлены на рис. 18.

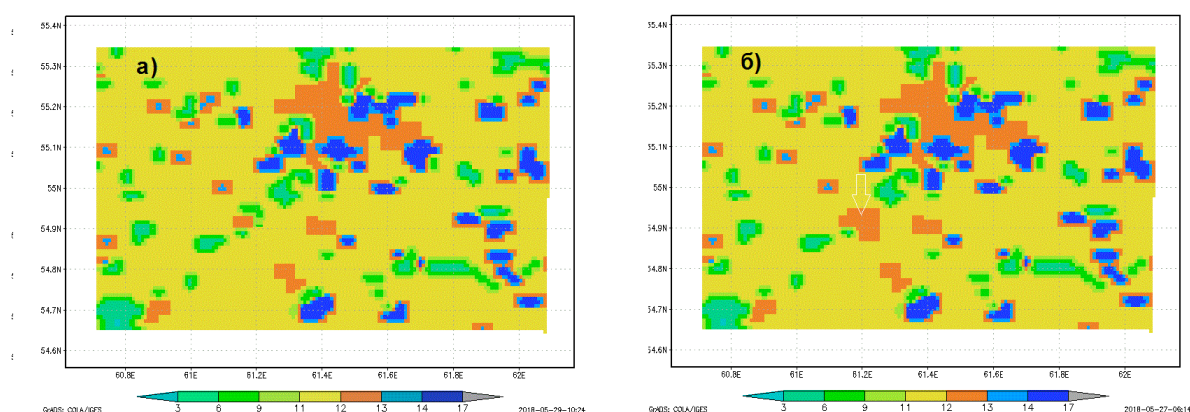


Рис. 18. Ландшафты, а) до изменения, б) после замены участка природного ландшафта на урбанизированную территорию.

Изображены следующие ландшафты: 13 – городская застройка; 12 –

с/х поля, 6–7 – залежи, покрытые кустарником и др., 10–11 местности, занятые луговой растительностью, заболоченные земли; 1–2, 3–4, 5 – хвойный, лиственный и смешанный лес, 17 – водные объекты.

Для примера численного моделирования с измененным ландшафтом выбрана синоптическая ситуация, которая сложилась над территорией Челябинской области 17-18 августа 2009 г.

В этот день согласно [37] наблюдались экстремальные условия загрязнения атмосферы Челябинска. В этот период территория области находилась на северной периферии циклона, приземный ветер был слабый переменный 0-3 м/с, на высотах ветер северный 3-5 м/с, инверсия не наблюдалась, влажность воздуха была высокая. Температура воздуха была 15-20 °С, временами шел слабый ливневый дождь.

В целом, по опыту О.Ю.Ленской и С.М.Абдуллаева, в таких погодных условиях воздействие новых ландшафтов параметры атмосферы могло быть более заметным.

Важно заметить, что для расчетов была использована конфигурация модели WRF (основные настройки, исходные данные, набор схем параметризации, вложенные сетки и т.д.) прошедшая процедуру валидации в ходе работ [6–10]. Это давало возможность для уверенной интерпретации измененных метеорологических полей.

Сравнение характеристик приземного слоя атмосферы рассчитанных моделью WRF до и после изменения ландшафтов (рис. 19–20). Поскольку наиболее явные изменения характеристик ландшафтов это изменения теплового баланса поверхностей [6-10] то, в качестве индикатора изменений выбраны поля температур. Так в центре изменённого ландшафта (рис.19) изменился суточный ход приземной температуры воздуха: утренняя температура 18 августа (00Z соответствует 05:00 утра местного времени) падала до 12°С в природном ландшафте (луг, лес), тогда как над урбанизированным этим участком она была 12,5°С.

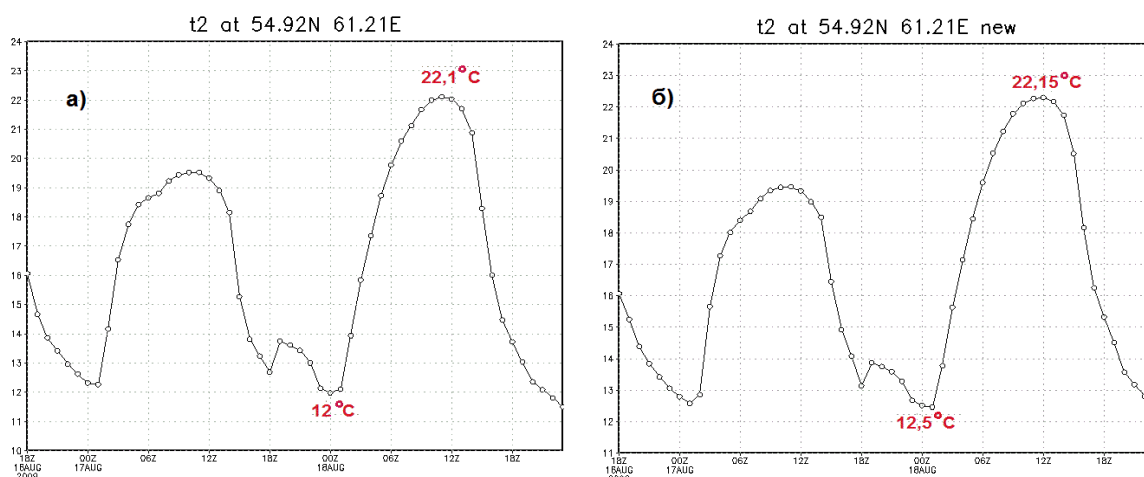


Рис.19. Суточный ход температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью в точке с координатами 54,92° с.ш., 61,21° в.д.: (а), (б); до и после замены участка природного ландшафта на урбанизированную территорию

По оси ординат – температура воздуха, °С. По оси абсцисс время 17-19 августа 2009 года.

Аналогичное превышение зафиксировано и на момент максимального прогрева воздуха (12Z соотв. 17:00 местного времени): в природном ландшафте температура достигала 22,1°С, а после урбанизации 22,15°С.

На рис. 20 изображено горизонтальное поле температур до (а) и после (б) изменения ландшафта.

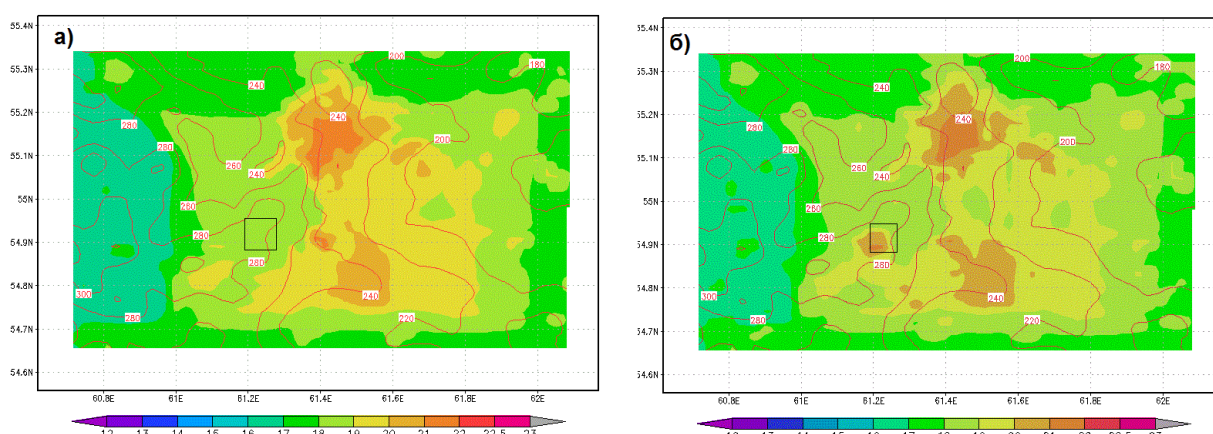


Рис. 20. Распределение приземной температуры, °С в 19:00 местного времени 18.08.09: а) до изменения; б) после изменения ландшафта. Квадрат – область трансформации ландшафта.

Горизонтальное поле температур показывает, что в области виртуальной урбанизации ландшафта (квадрат) к вечеру 18 августа возникло более 3-х градусное превышение температур по сравнению с близлежащими ландшафтами.

Отметим, что смещения максимума перегретого слоя к юго-западу от центра обусловлено северо-восточным направлением ветра. Очевидно, что такое смещенное тепловое «ядро» характерно для урбанизированной территории в условиях слабого воздушного обмена [10].

Таким образом, в результате численного эксперимента с применением Редактора для изменения площадей ландшафтов показано, что:

1) вычислительная система WRF-ARW ассимилируют измененные характеристики ландшафтов и использует их в процессе дальнейших вычислений;

2) при этом валидированная версия модели достаточно чувствительна к смене типа ландшафта, демонстрируя значительное влияние урбанизации на масштабах несколько километров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы было создание Редактора, который бы позволял произвести подготовку данных о свойствах подстилающей поверхности, классах ландшафтов необходимых для запуска модуля программы WPS (WRF Processing System).

В ходе проведенной научно-исследовательской работы эта цель работы была достигнута, что подтверждается решением следующих задач:

- 1) изучена методическая документация WRF Preprocessing System (WPS);
- 2) изучены подходы к редактированию типов природных и антропогенных ландшафтов в WPS и выбраны алгоритмы редактирования;
- 3) разработана и прошла тестирование программа подготовки входных данных для программы geogrid модуля WPS (WRF Preprocessing System);
- 4) проведен численный эксперимент демонстрирующий, что модель WRF ассимилирует измененные в Редакторе ландшафты и чувствительна к этим изменениям.

В перспективе созданное приложение поможет эффективно использовать модель WRF для исследования влияния трансформации ландшафта Челябинской области на окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. [Электронный ресурс] URL: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf (дата обращения: 10.02.2017).
2. Aligo, Eric A., et al. On the Impact of WRF Model Vertical Grid Resolution on Midwest Summer Rainfall Forecasts. // *Weather & Forecasting*, 2009. – Vol. 24. – P. 575–594.
3. ARW Users Guide. [Электронный ресурс] URL: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.9/ARWUsersGuideV3.9.pdf (дата обращения: 20.12.2017).
4. Bengtsson L., Arkin P., et al. The need for a dynamical climate reanalysis // *Bul. Amer. Met. Soc.*, 2007. – С. 495–501.
5. Bengtsson L., Shukla J. Integration of space and in situ observations to study global climate change. // *Bul. Amer. Met. Soc.*, 1988. – P. 1130–1143.
6. Coniglio, M. C. et al. Evaluation of WRF Model Output for Severe Weather Forecasting from the 2008 NOAA Hazardous Weather Testbed Spring Experiment. // *Weather & Forecasting*, 2010. – Vol. 25(1). – P. 408–427.
7. Coniglio, Michael C. et al. Verification of Convection-Allowing WRF Model Forecasts of the Planetary Boundary Layer Using Sounding Observations. // *Weather & Forecasting*, 2013. – Vol. 28. – P. 842–862.
8. Davis Christopher et al. Prediction of Landfalling Hurricanes with the Advanced Hurricane WRF Model. // *Mon. Wea. Rev.*, 2008. – С. 136.
9. Fei Chen et al. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. // *International Journal of Climatology Special Issue: ICUC-7 Urban Climate Meeting*, 2011. – Vol. 31. – P. 273-288.
10. FM 92 GRIB. [Электронный ресурс] URL: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPS/FM92-GRIB2-11-2003.pdf> (дата обращения: 10.02.2017).

11. Herbert S. Java: The Complete Reference. Introducing Graphics – UK: Oracle Press, 2007. – P. 811–919.
12. Hsiao, Ling-Feng et al. Application of WRF 3DVAR to Operational Typhoon Prediction in Taiwan: Impact of Outer Loop and Partial Cycling Approaches. // *Weather & Forecasting*, 2012. – Vol. 27. – P. 1249–1263.
13. Java Tutorial/2D Graphics/BufferedImage. [Электронный ресурс] URL: http://jexp.ru/index.php/Java_Tutorial/2D_Graphics/BufferedImage (дата обращения: 10.02.2017).
14. Kalnay E., Kanamitsu et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. // *Bul. Amer. Met. Soc.*, 1996. – Vol. 77. – No 3. – P. 437–471.
15. Karan, Haldun et al. The Formation of Multiple Squall Lines and the Impacts of WSR-88D Radial Winds in a WRF Simulation. // *Weather & Forecasting*. 2010. – Vol. 25. – P. 242–262.
16. Lenskaia O.Yu., Abdullaev S.M. Modeling Study of Atmospheric Boundary Layer Characteristics in Industrial City by the Example of Chelyabinsk // Preprints, 94th AMS Annual Meeting “Extreme Weather—Climate and the Built Environment: New Perspectives, Opportunities, and Tools”, 2014, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 661. [Электронный ресурс] URL: <https://ams.confex.com/ams/94Annual/webprogram/Paper234983.html>
17. NMM Version 3 Modeling System User’s Guide April 2014. [Электронный ресурс] URL: https://dtcenter.org/wrf-nmm/users/docs/user_guide/V3/users_guide_nmm_chap1-7.pdf (дата обращения: 20.12.2017).
18. Schwartz, Craig S. Reproducing the September 2013 Record-Breaking Rainfall over the Colorado Front Range with High-Resolution WRF Forecasts. // *Weather & Forecasting*, 2014. – Vol. 29. – P. 393–402.
19. The Global Weather Research and Forecasting (GWRF) Model: Model Evaluation, Sensitivity Study, and Future Year Simulation. / Yang Zhang, Joshua Hemperly, Nicholas Meskhidze, William C. Skamarock. // *Atmospheric and Climate Sciences*, 2012. – P. 231–253.

20. Trier, S. B. et al. Effects of Surface Heat and Moisture Exchange on ARW-WRF Warm-Season Precipitation Forecasts over the Central United States. // Weather & Forecasting, 2011. – Vol. 26(3). – P. 3–25.

21. Venkata B. Dodla et al. A Comparison of HWRF, ARW and NMM Models in Hurricane Katrina (2005) Simulation. // Int. J. Environ. Res. Public Health, 2011. – P. 2447–2469.

22. WRF - Weather Research & Forecasting Model [Электронный ресурс] URL: www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model (дата обращения: 01.06.2018).

23. WRF basics. [Электронный ресурс] URL: http://www.meteo.unican.es/work/2012_Garcia-Diez_VALUE_WRF.pdf (дата обращения: 01.01.2018).

24. Абдуллаев С.М. Напольских Е.А., Ленская О.Ю. К вопросу объективного определения случаев экстремального загрязнения городской атмосферы (на примере Челябинска) // Наука ЮУрГУ Материалы 67-й научной конференции. Сер. "Секции естественных наук", 2015. – С. 49–59.

25. Дроздов О.А. и др. Климатология. – Л. Гидрометеиздат 1989. – С. 568.

26. Зарипов Р.Б. Обзор современных методов повышения детализации метеорологических полей. // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, 2010. – Т. 1(1). – № 1. – С. 4–16.

27. Ленская О. Ю, Абдуллаев. С. М. Перспективы использования модели WRF для исследования острова тепла г. Челябинска // Наука ЮУрГУ: сборник трудов 64-й научной конференции профессорско-преподавательского состава. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 8.

28. Ленская О.Ю., Абдуллаев С.М. Некоторые характеристики городского острова тепла в дни с экстремальным уровнем загрязнения. // Наука ЮУрГУ Материалы 69-й научной конференции, 2017. – С. 24–31.

29. Ленская О.Ю., Абдуллаев С.М. Предварительные результаты валидации модели атмосферного приземного слоя г. Челябинска в дни с экстремальным уровнем загрязнения // Наука ЮУрГУ Материалы 68-й научной конференции. Сер. "Секции естественных наук", 2016. – С. 168–175.
30. Майерс Г., Баджет Т. Искусство тестирования программ. – М: Вильямс, 2012. – С. 272.
31. Смирнова М.М., Рубинштейн Г.К. Анализ примеров усвоения данных в региональной модели WRF-ARW. //Труды ГМЦ РФ, 2012. – С. 95–112.
32. Старченко А.В. Численное исследование локальных атмосферных процессов. // Вычислительные технологии, 2005. – Т. 10. – № 3. – С. 81–89.
33. Торопова М.Л. Исследование особенностей динамического даунскейлинга при помощи модели WRF-ARW. // Тез. докл. XII Большого Географического Фестиваля: «Географические исследования Евразии: история и современность», 2016. – С. 273–275.
34. Численное моделирование характеристик пограничного слоя атмосферы крупного промышленного города (на примере г. Челябинска) / Ленская О. Ю, Абдуллаев С. М., Приказчиков А.И., Соболев Д.Н. // Вестник Южно-Уральского Университета. Серия Вычислительная математика и информатика, 2013. – № 2. – С. 65–82.
35. Чукин В.В., Мостаманди С.В., Савина З.С. Предварительные результаты численных прогнозов погоды с помощью модели WRF-ARW на европейской территории России. // Успехи современного естествознания, 2011. – № 11 – С. 75–76.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Описание переменных файла namelist.wps

Имя переменной	Значение	Описание
&share		
WRF_CORE	‘ARW’, ‘NMM’	Динамическое ядро модели
MAX_DOM	По умолчанию - 1	Число (целое) уровней сетки (вместе с «материнским») – number of domains/nests including parent domain
START_YEAR	ГГГГ	Дата и время начала счета (целые числа, определяются для каждого домена, уровня)
START_MONTH	ММ	
START_DAY	ДД	
START_HOUR	ЧЧ	
END_YEAR	ГГГГ	Дата и время окончания счета (целые числа, определяются для каждого домена, уровня)
END_MONTH	ММ	
END_DAY	ДД	
END_HOUR	ЧЧ	
START_DATE	ГГГГ-ММ-ДД ЧЧ:ММ:СС	Аналог более высокого ранга (см. выше)
END_DATE	ГГГГ-ММ-ДД ЧЧ:ММ:СС	Аналог более высокого ранга (см. выше)
INTERVAL_SECONDS	Целое число в секундах	Интервал счета
IO_FORM_GEOGRID	1 – бинарный (.int); 2 – для NetCDF (.nc); 3 – GRIB1 (.gr1). Значение по умолчанию – ‘2’.	Формат файлов, которые будут записаны программой Geogrid.exe (указывается целое число от 1 до 3)
OPT_OUTROUT_FROM_GEOGRID_PATH	Значение по умолчанию – ‘./’	Пусть к директории (относительный или абсолютный), содержащей файлы (читаемые и записываемые)
DEBUG_LEVEL	По умолчанию - 0	Пороговое значение выдачи

		информации программы отладки в стандартном отчете (целое число от 0 до 1000, чем больше число – тем больше информации выдается)
&geogrid		
PARENT_ID	Значение по умолчанию - 1	Для каждого уровня определяется материнский домен (ставится в соответствие целое число с номером материнского домена)
PARENT_GRID_RATIO	Целое число (нет значения по умолчанию)	«отношение к родительской сетке», условно говоря – отношение масштаба гнезда к масштабу родительского домена, у материнского домена равно 1.
I_PARENT_START	Целое число (нет значения по умолчанию)	Целое число, определяющее координату x левого нижнего угла «не разнесенной» сетки родительского домена (для каждой ячейки). Для материнского домена в соответствие ставится 1.
J_PARENT_START		Целое число, определяющее координату y левого нижнего угла «не разнесенной» сетки (для каждой ячейки). Для самой крупной сетки в соответствие ставится 1.
S_WE	Значение по умолчанию – 1.	Начальная точка сетки домена (задается для каждого домена) в восточно-западном направлении (для должна быть задана как 1, 1).
E_WE	Нет значения по умолчанию (задается по количеству ячеек в сетке домена).	Конечная точка сетки домена (задается для каждого домена) в восточно-западном направлении (для вложенных доменов равняется $n * \text{parent_grid_ratio} - 1$).
S_SN	Значение по умолчанию	Начальная точка сетки домена (задает-

	– 1.	ся для каждого домена) в северо-южном направлении (должна быть задана как 1, 1).
E_SN	Нет значения по умолчанию (задается по количеству ячеек в сетке домена).	Конечная точка сетки домена (задается для каждого домена) в северо-южном направлении.
GEOG_DATA_REES	Значение по умолчанию – ‘default’	Список символьных переменных, определяющих для каждого гнезда разрешение исходных данных, используемых при интерполировании данных рельефа в сетку модели.
DX	Значение по умолчанию – 10 000	Вещественное значение, расстояние в сетке по оси Ох для определения масштаба (1:dx, в метрах).
DY	Значение по умолчанию – 10 000	Вещественное значение, расстояние в сетке по оси Оу для определения масштаба (1:dy, в метрах).
MAP_PROJ	Возможные значения – ‘Lambert’, ‘polar’, and ‘Mercator’. Значение по умолчанию - ‘Lambert’.	Символьная переменная, определяющая картографическую проекцию.
REF_LAT		Параметры используемой проекции
REF_LON		
REF_X		
REF_Y		
TRUELAT1	Нет значения по умолчанию	
TRUELAT2		
STAND_LON		
GEOG_DATA_PATH	Нет значения по умолчанию	Путь (абсолютный или относительный) к директории, содержащей данные рельефа
OPT_GEOGRID_	Значение по умолчанию	Путь к вспомогательному файлу ge-

TBL_PATH	‘/geogrid/’	ogrid.TBL
&ungrib		
OUT_FORMAT	Возможные значения – ‘WPS’, ‘SI’, ‘MM5’. Значение по умолчанию ‘WPS’.	Формат выходных данных
&metgrid		
FG_NAME	По умолчанию – пустой список	Указание пути и префикса имени для файлов с данными
CONSTANTS_NAME	По умолчанию – пустой список	Указание пути для стационарных файлов с данными
IO_FORM_METGRID	Возможные значения 1) бинарный; 2) NetCDF; 3)GRIB1. Значение по умолчанию 2	Формат выходных данных
OPT_OUTPUT_FROM_METGRID_PATH	Значение по умолчанию ‘/’ (в текущем каталоге)	Путь к выходным файлам
OPT_METGRID_TLB_PATH	Значение по умолчанию ‘/metrid/’	Путь к вспомогательному файлу met-grid.TBL
OPT_IGNORE_DOMAIN_CENTER	Значение по умолчанию – ‘FALSE’	Логическое значение, указывающее, должна ли игнорироваться интерполяция метеорологических данных на внутренние области домена (возможно для ускорения расчетов)

Приложение 2

Код скрипта для визуализации поверхностной температуры исследуемого домена.

```
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/wrf/WRFUserARW.ncl"
begin
  filename = "wrfout_d01_2007-12-06_12:00:00"
  a      = addfile(filename,"r")
```



```

times = wrf_user_list_times(a)
it = 0
print("Working on time: " + times(it) )
tc = wrf_user_getvar(a,"tc",it)
t2 = tc(0,::)
t2 = 1.8*t2+32.
delete(tc)
t2@description = "Surface_Temperature"
t2@units = "degF"
wks = gsn_open_wks("png","wrf_t_2")
res = True
res@vpWidthF = 0.6
res@vpHeightF = 0.6
res@cnFillOn = True
plot = wrf_contour(a,wks,t2,res)
draw(plot)
frame(wks)
end

```