



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

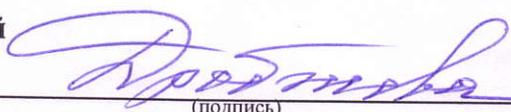
Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Оценка пожарной опасности в лесах по условиям погоды
с использованием результатов гидродинамического моделирования

Исполнитель Лалохина Ектерина Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

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

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой 
(подпись)

доктор физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«В» июня 2018 г.

Санкт-Петербург
2018

Содержание

	стр.
Введение.....	3
1 Метеорологические условия возникновения лесных пожаров.....	6
1.1 Метеорологические характеристики, влияющие на пожароопасность.....	6
1.1.1 Влажность воздуха.....	6
1.1.2 Температура.....	7
1.1.3 Ветер.....	13
1.1.4 Осадки.....	13
1.2 Комплексные показатели пожарной опасности по условиям погоды.....	14
1.2.1 Комплексный показатель пожарной опасности В.Г. Нестерова.....	14
1.2.2 Комплексный показатель пожарной опасности Л.И. Сверловой.....	18
1.2.3 Комплексные показатели пожарной опасности по условиям погоды М. А. Софронова.....	20
1.2.4 Комплексный показатель пожарной опасности М. Я. Здеревой.....	22
1.2.5 Комплексный показатель пожарной опасности Г.П. Телицына.....	24
2 Особенности модели WRF при прогнозе метеорологических полей.....	26
2.1 Структура модели WRF.....	28
2.1.1 Система предпроцессинга.....	28
2.1.2 Система ассимиляции данных.....	30

2.1.3	Система моделирования.....	31
2.1.4	Система постпроцессинга.....	35
2.2	Изменение конфигурации модели WRF.....	36
2.2.1	Параметры списка вводимых переменных файла namelist.wps.....	36
2.2.2	Параметры списка вводимых переменных файла namelist. input.....	42
3	Оценка пожарной опасности по условиям погоды.....	47
3.1	Расчет индексов пожарной опасности с помощью данных реанализа.....	47
3.2	Расчет индексов пожарной опасности с помощью результатов гидродинамического моделирования.....	50
3.3	Оценка качества прогноза пожарной опасности по результатам гидродинамического моделирования.....	54
3.3.1	Визуальная верификация.....	54
3.3.2	Статистическая верификация.....	56
3.3.3	Диагностические методы верификации результатов прогноза.....	61
	Заключение.....	64
	Список использованных источников.....	66
	Приложение №1.....	69
	Приложение №2.....	73

ВВЕДЕНИЕ

Как известно пожары – опасное явление, наносящие огромный и трудновосполнимый ущерб природе и человеку. Но, несмотря на опасность этого явления, пожары возникают регулярно, хотя в наших силах взять это явление под контроль, принимая своевременные меры по контролю пожароопасных ситуаций. Основная причина пожара – человеческая деятельность, однако и погодные условия вносят большой вклад в возникновение пожаров, в первую очередь в лесах.

Необходимость наличия информационных систем позволяющих прогнозировать пожароопасные ситуации по исходным данным побуждает к созданию схемы такого прогноза, что является целью данной работы.

На сегодняшний день основной особенностью прогнозирования пожарной опасности (ПО) по условиям погоды является обилие методик прогноза, связанное с многообразием факторов влияющих на возникновение лесных пожаров. Гидродинамическое моделирование позволяет учитывать роль различных конкурирующих процессов и их влияние на распределение метеорологических величин, позволяя оценить влияние этих величин на пожароопасную обстановку. Ввиду этого, прогноз пожарной опасности с помощью методов гидродинамического моделирования является актуальной научной и практической задачей.

В данной научно-исследовательской работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Изучить разработанные на данный момент методики прогноза пожарной опасности по условиям погоды.
2. Изучить методику гидродинамического прогноза с использованием мезомасштабной модели гидродинамической модели WRF.

3. С помощью модели WRF получить требуемые для прогноза пожароопасностиметеорологические характеристики для выбранного периода времени.
4. Выработать критерии, подходящие для прогноза пожароопасности по результатам прогноза модели.
5. Создать алгоритм расчета и визуализации выбранных критериев прогноза пожароопасности.
6. Провести анализ спрогнозированной и фактической пожароопасной обстановки и сделать выводы о том, какой из критериев наиболее достоверно прогнозирует пожароопасность для выбранного периода.

Из поставленных задач следует что, объектом данного исследования являлся прогноз пожарной опасности по условиям погоды, а предметом существующие критерии (методики) такого прогноза.

Для решения вышеуказанных задач были использованы методы статистической верификации, а так же математического моделирования. Расчеты критериев прогноза пожарной опасности и адаптация модели для прогнозирования метеорологических характеристик за весь выбранный период были реализованы на языке высокого уровня FORTRAN, а визуализация и статистический анализ были выполнены на языке PYTHON.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Общий объем работы составляет 75 страниц. Список использованных источников содержит 26 наименований.

Первая глава включает в себя подробный разбор факторов, которые считаются значимыми при прогнозе пожароопасности, и исследование существующих методик прогноза пожарной опасности по условиям погоды. Во второй главе рассматриваются особенности мезомасштабной гидродинамической модели WRF и ее ключевые параметры, понимание функций которых необходимо для создания успешного прогноза на

выбранной территории. В третьей главе описаны этапы создания алгоритма расчета и визуализации критериев пожароопасности, этапы создания и анализ оценки успешности результатов прогноза пожароопасности по условиям погоды.

1 Метеорологические условия возникновения лесных пожаров

Основной непосредственной причиной возникновения первичных очагов лесных пожаров являются ненадлежащие действия людей, посещающих лес с хозяйственной или рекреационной целями. Тем не менее, гидрометеорологические факторы способны заметно повлиять на распространение пожаров. Например, пожар, возникший по естественной (из-за разряда молнии) или по антропогенной причине (из-за неосторожного обращения с огнем), распространяется тем быстрее, чем меньше относительная влажность воздуха и больше скорость ветра. Погода также может являться фактором, препятствующим распространению пожаров: обложные дожди, сырая, ненастная погода предотвращают лесные пожары [1]. Кроме того, погода является самым непредсказуемым фактором, влияющим на пожароопасность: в зависимости от местности, погода может измениться в течение короткого времени. Слабый ветер может превратиться в сильные шквалы или же направление ветра может перемениться. Поэтому очень важно учитывать текущие погодные условия для повышения эффективности мер борьбы с лесными пожарами.

1.1 Метеорологические характеристики, влияющие на пожароопасность

1.1.1 Влажность воздуха

Влажность воздуха характеризует насыщенность атмосферы водяным паром. В зависимости от того, какова влажность воздуха, меняется влагосодержание лесных горючих материалов (ЛГМ), что влияет на пожароопасность.

По участию в горении ЛГМ подразделяются на три класса:

- проводники горения;
- поддерживающие горение;

- задерживающие горение [2].

К первому классу относятся те типы ЛГМ, которые вовсе или практически не способны регулировать свою влажность; к ним относятся мхи, лишайники, опад, лесная подстилка, торф валежник и т.д. Содержание влаги в ЛГМ этого типа определено только физическими законами увлажнения и высыхания.

Ко второму и третьему классу относятся травы, кустарники, подлесок, хвоя, листва, сучья и т.д., которые, поглощая влагу из почвы, могут регулировать интенсивность транспирации и поддерживать свою влажность. При этом, если их влагосодержание высоко, то эти ЛГМ задерживают горение, а в ином случае (это относится к растениям произрастающим в сухих условиях) – поддерживают его.

1.1.2 Температура

Одним из основных факторов, влияющих на степень пожароопасности по условиям погоды, является температура воздуха. Нагревание лесных горючих материалов, в результате чего происходит потеря влаги и уменьшается время загорания, способствует увеличению пожароопасности [2].

Температура воздуха оказывает влияние на пожарную опасность через дефицит влажности, появление и отмирание напочвенного покрова. Повышение температуры воздуха и почвы приводит к усилению водопоглощения растениями и ослабляет высыхание напочвенного покрова с одной стороны, а с другой – нагревание ЛГМ способствует повышению пожарной опасности.

Кроме непосредственного влияния на пожароопасную обстановку температура также оказывает косвенное воздействие на степень пожарной опасности. Например, температура поверхности почвы влияет на движение воздушных потоков. Передача тепла от земной поверхности в атмосферу происходит благодаря термической конвекции, турбулентности, излучению

ипереносу тепла за счет горизонтальных перемещений воздуха, а также при конденсации водяного пара. Температура может изменяться, как по горизонтали вдоль земной поверхности, так и по вертикали с подъемом вверх.

Летом при жаркой безоблачной погоде происходит неравномерный прогрев земной поверхности, и стратификация атмосферы становится неустойчивой: вертикальный температурный градиент (который для стандартной атмосферы равен $-0.65^{\circ}/100$ м) начинает увеличиваться, местами достигая величины $-1^{\circ}/100$ м. Начинается процесс тепловой конвекции - образования восходящих потоков воздуха (термиков), сначала небольших, а затем при благоприятных условиях погоды более крупных [3]. Если воздух не слишком сух (тут добавляется фактор влажности), то восходящие тепловые потоки достигают уровня конденсации. При условии сильной неустойчивости атмосферы термики объединяются, создавая более обширные конвективные потоки, которые в свою очередь образуют кучево-дождевые и мощно-кучевые облака, в которых с большой вероятностью могут развиваться процессы грозообразования. Возникающие при грозе молниевые разряды типа «облако-земля» служат источником возгорания при природных пожарах.

Влияние грозовой активности на пожароопасность

Поданным исследования, проведенного Е. А. Щетинским (2002 г.), основными причинами возникновения пожаров являются деятельность человека (более 50%) и молнии (до 17,5%).

Результаты его анализа были сведены в следующую таблицу:

Таблица 1.1 – Причины лесных пожаров в лесном фонде России, % от годового количества [2]

Основные причины	1985 г.	1990 г.	1995 г.	2000 г.
Хозяйственная деятельность человека и неосторожное обращение с огнем	64,8	64,3	81,8	72,1
Сельскохозяйственные палы	7,3	7,2	3,1	7,0
Лесозаготовки	2,9	2,4	0,8	0,6
Изыскательные и экспедиционные работы	0,9	0,7	0,1	0,1
Другие причины	5,0	4,2	1,6	3,2
Молнии	16,0	17,5	10,7	14,0
Неустановленные причины	3,1	3,7	1,9	3,0

А по данным А.Н.Дмитриева на долю молний приходится от 10% до 16% (в некоторых районах до 17,5%). Но для некоторых районов грозовая активность является основной причиной возникновения пожаров (до 90%), это в основном малонаселенные территории (Якутия, леса Алтая, Урал) [4].

Наиболее катастрофические последствия вызваны пожарами, образовавшимися в результате прохождения так называемых «сухих» гроз, которые, как следует из названия, протекают без выпадения осадков или при минимальном их количестве. Такие грозы формируются и развиваются в условиях засухи: при высокой температуре воздуха (рядом 40 °С) и низкой относительной влажности, при этом осадки не успевают достичь земной поверхности и испаряются в атмосфере. Сильное испарение способствует увеличению разности температур под облаком и перед ним, что приводит к возникновению шквалов, которые в свою очередь ускоряют распространение пожаров и увеличивают их силу [4]. Для умеренных широт благоприятными условиями возникновения сухих гроз являются:

- высота нижней границы облачности 1500-2500 м;
- относительная влажность 40%;
- температура воздуха на высоте двух метров 30 °С.

Однако такие грозы довольно редки и чаще прохождение грозы сопровождается выпадением разного количества осадков.

Внутримассовые (тепловые) грозы, механизм возникновения которых был описан выше, часто сопровождаются выпадением небольшого количества осадков, поэтому пожары вследствие этого вида гроз возникают чаще, чем при фронтальных. Тем не менее, в некоторых районах наблюдается противоположная зависимость: например при анализе молниевых разрядов, возникших в Красноярском крае в 2005 г. в результате прохождения фронтальных гроз, практически 100% из них приводило к пожарам.

Нет однозначного соответствия между местоположением грозового очага и пожаром, так как грозовой очаг часто находится в районе с высокой влажностью воздуха, в то время как пожары чаще образуются в зонах с более низкой влажностью.

Прохождение полосы осадков также не всегда является достаточным подтверждением отсутствия в данном районе возгорания, так как А. А. Листовым [5] было установлено, что под лесным покровом огонь может оставаться незатушенным на протяжении 5-10 дней с момента прохождения грозы.

Наблюдателю на земле довольно сложно с уверенностью отмечать возгорания, возникшие непосредственно в результате удара молнии, поэтому для исследования грозопожароопасности опираются на данные, полученные благодаря космическому мониторингу. Несмотря на то, что в литературе указывается, что наибольшее количество пожаров обнаруживается в первый день после прохождения грозы, при использовании средств космического мониторинга наибольшее количество пожаров обнаруживается только на 5-7 день после прохождения грозы. Это можно объяснить тем, что

при прохождении грозы поверхность Земли закрыта облаками, что препятствует наблюдению пожаров из космоса. Кроме того, у спутниковых радиометров существует предел обнаружительной способности, поэтому пожарам необходимо время, чтобы достичь размеров, при которых они могут регистрироваться космическими средствами [6].

Таким образом, на данный момент нельзя сделать однозначных выводов о связи характеристик гроз и пожароопасности, поскольку результаты по соответствию очагов пожаров типу грозы, прохождению полосы осадков и очагу грозы противоречивы. Поэтому вопрос прогноза грозопожароопасности на данный момент остается открытым и требует проведения дополнительных исследований.

Влияние антропогенной нагрузки на пожароопасность

Высокая температура воздуха, кроме косвенного влияния на пожароопасность через образование гроз, также увеличивает вероятность возникновения природного пожара в результате деятельности человека. При длительной жаре горимость ЛГМ увеличивается, в результате вероятность зажигания лесных горючих материалов «нагретыми до высоких температур одиночными частицами» вследствие рекреационной или хозяйственной деятельности возрастает [7].

По данным Е. А. Щетинского (см. таблицу 1.1) наибольшее влияние на возникновение лесных пожаров оказывает человеческая деятельность. Среди прогнозирования природных пожаров с оценкой антропогенного фактора наибольший интерес представляет работа Г. В. Кузнецова и Н. В. Барановского.

В их модели детерминированно-вероятностного прогноза лесопожарных возгораний используются следующие критерии:

- вероятность возникновения лесных пожаров вследствие антропогенной нагрузки;
- вероятность возникновения лесных пожаров вследствие грозовой активности (сухие грозы);

- вероятность возникновения лесных пожаров вследствие различных сценариев зажигания слоя ЛГМ.

Коэффициент антропогенной нагрузки, показывающий насколько сильно влияет деятельность человека на состояние природных систем, в данном случае рассчитывался по формуле:

$$A_{ij} = \frac{n_{\text{дн}}}{n_{\text{общ}}}, \quad (1.1)$$

где $n_{\text{дн}}$ – количество пожаров в конкретный день недели;
 $n_{\text{общ}}$ – общее число пожаров за неделю [8].

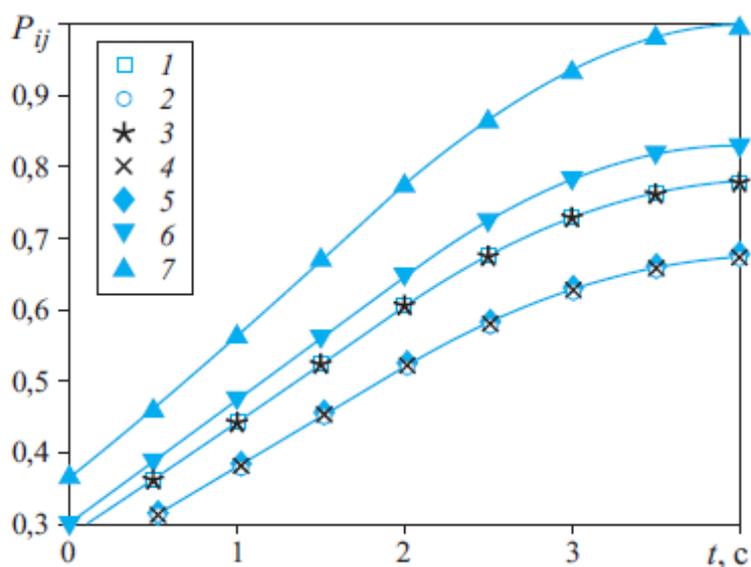


Рисунок 1.1 – Вероятность возникновения лесопожарных возгораний вследствие антропогенной нагрузки; 1-7 – дни недели [7]

Как видно из графика на рис. 2 вероятность возникновения лесных пожаров зависит от дня недели. Таким образом, введение весовых коэффициентов антропогенной нагрузки в различные методики прогноза пожароопасности может улучшить качество самого прогноза. Особенно это актуально для районов с большой плотностью населения.

1.1.3 Ветер

Ветер оказывает влияние на распространение пожара: чем он сильнее, тем быстрее распространяется пожар. Это происходит за счет того, что обеспечивается дополнительный приток кислорода, усиливающий горение, и происходит перенос пламени на расположенные по направлению ветра новые участки, в результате чего появляются новые очаги возгорания. Часто ветер является основной причиной верхового пожара, который особенно сложно предотвратить из-за его быстрого распространения.

Кроме того, лесной пожар сам по себе вызывает возникновение локальных воздушных потоков и усиливает влияние преобладающего ветра на распространение пожара. Возникает так называемая «тепловая колонка», когда воздух над поверхностью огня становится горячим и поднимается вверх, а его заменяет более холодный и свежий воздух, который устремляясь на место нагретого, усиливает горение [2].

Также ветер оказывает и иссушающее действие. Под влиянием ветра потеря влаги ЛГМ происходит значительно быстрее, что способствует росту вероятности их возгорания. Однако Софронов считает, что ветер не может существенно повлиять на испарение на лесных территориях вследствие того, что переносимый ветром воздух имеет такую же степень увлажнения, что и тот что был на соседнем участке. Это может быть справедливо для лесных территорий, но на открытых пространствах влияние ветра все же должно учитываться.

1.1.4 Осадки

Очевидно, что выпадение осадков способствует уменьшению пожарной опасности, однако из-за задерживающего эффекта крон деревьев, земли достигают не все осадки, а только их часть. Значит, разным типам леса требуется разное количество осадков для насыщения влагой ЛГМ. Так наименьшее количество осадков необходимо сосновому лесу (от 1 мм), а наибольшее – ельникам (15 мм). Однако тут имеет место и обратный

механизм испарения: как в тех типах леса, где полное увлажнение происходит быстро, так же быстро происходит и высыхание ЛГМ и наоборот. Следует учитывать и то, что для возникновения и распространения огня в лесу не нужно высыхания всей толщи напочвенного покрова, а для обеспечения невоспламеняемости лесных горючих материалов не требуется его полного смачивания [2].

На основании всех вышеперечисленных положений Нестеровым было предложено для учета осадков при прогнозировании пожарной опасности по условиям погоды использовать пороговое значение выпадения осадков – 3 мм, после которого их влияние на пожароопасность становится значимым. При этом Нестеровым было отмечено, что обложные осадки лучше смачивают покров, чем ливневые при таком же их количестве [9].

1.2 Комплексные показатели пожарной опасности по условиям погоды

Как показано ранее, условия погоды значительно влияют на пожароопасность, причем воздействие это происходит динамически: факторы погоды могут как увеличить, так и уменьшить степень пожарной опасности. Для учета погодных факторов при прогнозе пожароопасности несколькими учеными были проведены исследования, на основании которых были разработаны так называемые индексы (показатели) пожароопасности по условиям погоды.

1.2.1 Комплексный показатель пожарной опасности В.Г. Нестерова

Первые попытки создать шкалы пожароопасности и оценить показатели горимости были проведены на основании предположения о влиянии одной главенствующей метеорологической характеристики, влияющей на пожароопасность. Такое положение вещей сохранялось до тех пор, пока Нестеров в 1949 г. не опубликовал свое исследование, основанное

более чем на 600 опытах, доказывающих комплексное влияние метеоусловий на степень горимости лесов. На основании этого факта Нестеровым была выдвинута гипотеза о том, что горимость лесов увеличивается при увеличении времени бездождного периода, на протяжении которого предлагалось рассматривать не одну метеохарактеристику, а их комплекс. Так был разработан комплексный показатель пожарной опасности по условиям погоды на основании общих физических законов.

Вывод показателя горимости

Эмпирическим путем было установлено, что увеличение горимости пропорционально приращению бездождного периода умноженного на среднее значение исследуемой метеорологической характеристики (или их комплекса).

$$dG = \alpha * Fdn, \quad (1.2)$$

- где α – коэффициент пропорциональности, является константой;
 G – горимость по условиям погоды;
 n – время, прошедшее после последнего дождя;
 F – обозначение метеохарактеристики или их комплекса.

$$F = \frac{\sum_{m=1}^m F_i}{m}, \quad (1.3)$$

m – число замеров метеопоказателя за время n .

В свою очередь m зависит от интервала времени между измерениями (y) и временем бездождного периода:

$$m = \frac{n}{y}, \quad (1.4)$$

Если принять $y = 1$ (то есть производить измерения один раз в сутки), то приращение горимости будет равно:

$$dG = \alpha \sum_{m=1}^m F_i \frac{dn}{n} . \quad (1.5)$$

Отсюда, сам показатель горимости будет равен:

$$G = \alpha \sum_{m=1}^m F_i * \ln(n) + G_0 , \quad (1.6)$$

где G_0 – начальная горимость территории, которую можно приравнять к нулю после прохождения дождя

То есть, фактически, показатель горимости растет с каждым новым днем без дождя и обнуляется после прохождения дождя. Таким образом, горимость лесного покрова может быть достаточно точно представлена только значением метеорологической характеристики или их комплекса за бездождный период, что дает возможность упростить формулу (1.6):

$$G = \sum_{m=1}^m F_i + G_0 , \quad (1.7)$$

В качестве обобщенной метеохарактеристики Нестеровым было рассмотрено три параметра: температура воздуха на высоте 2 метра в °C (t), дефицит точки росы на высоте 2 метра (d) и их произведение ($t*d$); связь остальных метеопараметров из результатов опытов оказалась незначимой. В результате, после вычисления коэффициентов корреляции между горимостью и приведенными комплексными показателями пожарной

опасности, наиболее сильной оказалась связь характеристики $(t*d)$ с горимостью леса:

$$G_H = \sum_{m=1}^m t(t - d) [9]. \quad (1.8)$$

Классы пожарной опасности по Нестерову

В продолжение исследования связи комплексных показателей пожарной опасности (КППО) и горимости, Нестеровым было рассчитано около 20000 значений индексов, где в качестве обобщенной метеохарактеристики были рассмотрены как двухфакторные (температура воздуха и протяженность бездождного периода, дефицит точки росы и протяженность бездождного периода), так и трехфакторный (произведение температуры воздуха и дефицита точки росы за бездождный период) показатели. В результате, в отличие от однофакторных показателей, диапазон значений КППО распадается как бы на три класса:

- 1) наибольшие показатели, при которых покров обладает горимостью;
- 2) промежуточные, при которых наблюдались случаи горимости и не горимости;
- 3) наименьшие, при которых лесной покров не горит [9].

Наилучшую характеристику горимости дал трехфакторный показатель, поэтому ориентируясь именно на его распределение, была разработана шкала (или классы) пожарной опасности по условиям погоды по Нестерову (см. таблицу 1.2)

Таблица 1.2 – Шкала пожарной опасности в лесу по условиям погоды по В. Г. Нестерову [10]

Класс пожарной опасности по условиям погоды	Диапазон значения индекса горимости, (С)2*сут	Пожарная опасность
I	0 -300	Отсутствует
II	301 - 1000	Малая
III	1000 - 4000	Средняя
IV	4001 - 10000	Высокая
V	>10000	Чрезвычайная

В качестве порога, после которого происходит обнуление индекса пожароопасности, принято считать выпадение осадков 3мм/сут и более.

1.2.2 Комплексный показатель пожарной опасности Л.И. Сверловой

Как было описано выше, Нестеров предполагал, что скорость ветра не оказывает значительного влияния на степень пожароопасности, вследствие того, что лесной покров заглушает его порывы и общую силу. Тем не менее, по результатам исследования Сверловой, была выявлено влияние скорости ветра на горимость и введена соответствующая поправка в КППО Нестерова, что, как оказалось, добавило индексу универсальности.

По разработанному Сверловой методу степень пожарной опасности определялась по следующей формуле:

$$G_{cv} = \sum_{m=1}^m K_v(V) * t(t - d) \quad [11]. \quad (1.9)$$

Коэффициент $K_v(V)$ определяется по соответствующей таблице (табл. 4) и учитывает скорости ветра в диапазоне от 3 до 16 м/с, меняясь от 1 до 1,48 соответственно.

Таблица 1.3 – Коэффициент ПО (K_v), учитывающий влияние скорости ветра (V) на возникновение и распространение лесных пожаров [11]

V	K_v	V	K_v	V	K_v	V	K_v
0	1,00	5	1,16	10	1,39	15	1,47
1	1,02	6	1,22	11	1,41	16	1,48
2	1,04	7	1,28	12	1,43		
3	1,07	8	1,32	13	1,45		
4	1,11	9	1,36	14	1,46		

Также была учтена связь комплексного показателя пожарной опасности от количества выпавших осадков за сутки. Как отмечал Нестеров, чем продолжительней бездождный период, тем большее количество осадков необходимо для «сбрасывания» КППО. Если Нестеровым было установлено пороговое значение 3мм/сут в независимости от текущего класса пожарной опасности для данной местности, то Сверловой предлагается для более высоких классов ПО увеличить пороговое значение выпавших осадков, необходимое для обнуления индекса. Конкретные значения количества выпавших осадков, при которых происходит исчезновение пожарной опасности в лесах, представлены в таблице 1.4.

Также Сверловой был увеличен порог достижения чрезвычайной пожарной опасности с 10000 °C/сут до 12000 °C²/сут (см. таблицу 1.4), позволив увеличить универсальность использования индекса, применимость которого распространилась не только территорию России и стран СНГ но и на Восточную Европу [11].

Таблица 1.4 – Количество осадков за предыдущие сутки, при котором сбрасывается КПО [11]

КП (в °С)	ΣQ (в мм)	КП (в °С)	ΣQ (в мм)	КП (в °С)	ΣQ (в мм)
0-300	3	4001-5000	7	9001-10000	12
301-1000	6	5001-6000	8	10001-11000	13
1001-2000	4	6001-7000	9	11001-12000	14
2001-3000	5	7001-8000	10	> 12000	15
3001-4000	6	8001-9000	11		

Таким образом, модифицированный индекс пожарной опасности по условиям погоды Сверловой учитывает влияние четырех метеопараметров на степень ПО: температуры воздуха, дефицита точки росы, скорости ветра и осадков, а также имеет большую пространственную универсальность, чем индекс Нестерова.

1.2.3 Комплексные показатели пожарной опасности по условиям погоды М. А. Софронова

Изначально выведенный эмпирически комплексный показатель горимости по условиям погоды Нестерова был признан допустимым после теоретического установления соответствия между суммой значений $t^*(t-d)$ °С²/сут и радиационным балансом, как энергии обеспечивающей процесс испарения влаги в субстрате. Тем не менее, как признавал сам Нестеров, необходимо продолжать исследование влияния остальных метеохарактеристик на пожароопасность, поэтому со временем появились модификации индекса Нестерова с введением поправок на различные метеорологические факторы.

Одной из метеовеличин, значительно влияющей на степень пожарной опасности, является влажность. Она была учтена Нестеровым при условии испарения со свободной поверхности воды до полного высыхания, однако с

гигроскопичных ЛГМ (мхов, лишайников, опада) вода испаряется не полностью, а до уровня равновесной влажности. Таким образом, при влажности воздуха 85% и более гигроскопичные ЛГМ теряют способность к горению, хотя показатель горимости Нестерова при этом будет расти [12].

Чтобы убрать этот эффект, Софроновым в 1990 г. была введена поправка на гигроскопичность лесных горючих материалов и формула (1.6) приобрела следующий вид:

$$G_{co} = \sum_{m=1}^m (t + 10^{\circ})(t - d - 3^{\circ}), \quad (1.10)$$

Физический смысл показателя объясняется следующим образом. Если относительная влажность достигает 85% и более, то разность $t^*(t-d)$ становится отрицательной и индекс Софронова начинает уменьшаться. К первому члену комплексного показателя добавлена величина +10 для того, чтобы, во первых, можно было пользоваться шкалой Нестерова для определения класса ПО, а во вторых, чтобы при расчете пожарной опасности в сезон с отрицательными температурами индекс оставался положительным [12].

В дальнейшем выяснилось, что относительная влажность воздуха в лесу редко достигает и значительное время держится на значении 85% и более, поэтому поправка на гигроскопичность была увеличена до 5°C, что соответствует относительной влажности воздуха 75%.

$$G_{co} = \sum_{m=1}^m (t + 10^{\circ})(t - d - 5^{\circ}), \quad (1.11)$$

Во время продолжительного периода без дождя нецелесообразно полностью обнулять индекс пожарной опасности, так как величины осадков

более 3 мм может оказаться недостаточно для полного снятия угрозы возникновения пожаров. В связи с этим Софроновым был введен, отражающий поправку на количество выпавших осадков:

$$K_{oc} = 1,8 / (r + 1), \quad (1.12)$$

где r – количество осадков за предыдущий день.

Коэффициент K_{oc} стремится к нулю при росте количества выпавших осадков, при этом, если сумма осадков меньше 0,6 мм $K_{oc} = 1$.

Также Софронов предлагает другой способ учета выпавших осадков в зависимости от скорости их выпадения:

$$K_{oc} = 1,8 / (1,3\tau + 1), \quad (1.13)$$

где τ – суточная продолжительность выпавших осадков.

Однако в данном исследовании этот коэффициент не удобен, так как такой учет осадков производится в основном в США и не используется в России.

1.2.4 Комплексный показатель пожарной опасности М. Я. Здеревой

В отличие от остальных индексов, рассматриваемых в данной работе, индекс пожарной опасности Здеревой, предложенный в 2009 г., гораздо точнее учитывает физические законы, а именно зависимость упругости насыщения от температуры. Из-за отсутствия мощной вычислительной техники Нестеровым была выведена относительно простая квадратичная зависимость между температурой воздуха и дефицитом точки росы, однако на сегодняшний день известно, что эта зависимость логарифмическая, и ее

можно описать достаточно точной эмпирической зависимостью, например формулой Магнуса [13]:

$$E = E_0 10^{\frac{a*t}{b+t}}, \quad (1.14)$$

где E_0 – суточная продолжительность выпавших осадков;
 $E_0 = 6,1078$ гПа,
 a и b – константы, которые определены на основании уравнения Клаузиуса-Клапейрона о сохранении энергии при фазовых переходах. $a = 8,61503, b = 273,15$.

Тогда для температуры воздуха уравнение (3) принимает вид:

$$E = E_0 * 10^{\frac{8,61503 * t}{273,15 + t}}, \quad (1.15)$$

для точки росы (t_d):

$$E = E_0 * 10^{\frac{8,61503 * d}{273,15 + d}}, \quad (1.16)$$

Таким образом, модифицированный индекс Здеревой можно представить в виде разностей упругостей насыщения температуры воздуха и температуры точки росы:

$$G_{3d} = \sum_{m=1}^m \left(E_0 * 10^{\frac{8,61503 * t}{273,15 + t}} - E_0 * 10^{\frac{8,61503 * d}{273,15 + d}} \right). \quad (1.17)$$

Авторы индекса советуют подбирать шкалу для классов ПО путем анализа опытных данных, поэтому для адекватной работы индекса

необходимо сопоставить его со значимой выборкой фактических данных о степени пожарной опасности на исследуемой территории [13].

При современных вычислительных возможностях КППО Здеревой, основанный на физико-статистических законах при подборе соответствующих ему классов пожарной опасности, приставляется более предпочтительным, чем выведенный эмпирически индекс Нестерова.

1.2.5 Комплексный показатель пожарной опасности Г.П. Телицына

Для оценки пожарной опасности по условиям погоды на основании исследований скорости высыхания лесных горючих материалов Телицыным был предложен логарифмический показатель пожарной опасности по условиям погоды:

$$G_T = \sum_{m=1}^m \lg(t - d) [14]. \quad (1.18)$$

Также этот индекс потребовал создания специальной шкалы пожароопасности по Телицыну (см. таблицу 6). При этом вначале и в конце пожароопасного сезона, когда преобладают отрицательные температуры воздуха, выявлена более высокая точность определения степени пожарной опасности по сравнению со шкалой, основанной на показателе В.Г. Нестерова, но при положительных значениях температуры шкала некорректно отображает экстремальную пожарную опасность.

Недостатком данного индекса является его резкое падение, когда разность температуры воздуха и температуры точки росы становится меньше единицы, что не очень хорошо отображается при попытке визуализировать результаты расчета индекса для некоторой территории. Кроме того, при сравнении этого показателя с индексом Нестерова из-за несоответствия шкал требуется проводить дополнительную нормализацию, что не всегда удобно.

Таблица 1.5 – Шкала определения степени пожарной опасности по Г. П. Телицыну [15]

Класс ПО	I	II	III	IV
Значения логарифмического показателя ПО	<2	2.1 – 3.5	3.6 - 5	>5
Степень пожарной опасности	Полная негоримость	Малая горимость	Средняя горимость	Высокая горимость

2 Особенности модели WRF при прогнозе метеорологических полей

Для того чтобы проанализировать точность прогноза пожарной опасности необходимы прогностические поля требуемых метеорологических характеристик за весь пожароопасный период. В данном исследовании для моделирования прогностических полей использовалась мезомасштабная гидродинамическая модель атмосферы WRF (Weather Research and Forecasting model).

WRF представляет собой современную систему атмосферного моделирования с возможностью адаптации к определенной территории и проведению численных экспериментов как для реальных, так и идеализированных условий. Для решения гидродинамических задач создано два динамических ядра известных как WRF-ARW (Advanced Research WRF) WRF-NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model). Работа над развитием и усовершенствованием WRF-ARW проводилась лабораторией NCAR по мезо- и микромасштабной метеорологии. Ядро WRF-NMM, развиваемое национальным центром прогноза окружающей среды (NCEP), на данный момент используется в системе моделирования HurricaneWRF.

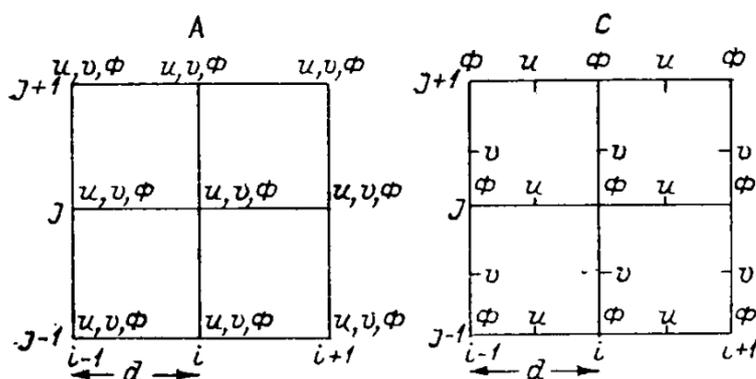


Рисунок 2.1 – Сетки точек, используемые в модели WRF[16]

Очевидно, что для решения задач данного исследования вполне подходит модель WRF с ядром ARW. Эта модель представляет собой полностью несжимаемую негидростатическую модель. В качестве системы координат по вертикали используется гибридная система координат.

Данные реанализа поступают в модель, располагаясь на сетке Аракавы типа А (рис. 2.1), то есть переменные u , v , Φ располагаются вместе в каждом узле сетки. Известно, что система полных уравнений гидродинамики описывает как крупномасштабные волны, так и волны более мелких масштабов, к которым относятся гравитационные и гравитационно-инерционные волны [17]. Эти мелкомасштабные волны возникают при нарушении квазигеострофического равновесия и затухают при его восстановлении. В результате анализа конечно-разностного аналога системы одномерных уравнений, описывающих одномерную гравитационную волну, установлено, что фазовая скорость волны зависит от длины волны и шага сетки. Уменьшение длины волны при сохраняющемся шаге сетки заставляет фазовую скорость уменьшаться, а при сокращении длины волны до двух шагов сетки фазовая скорость становится равна нулю.

Таким образом, если вблизи узла сетки типа А возбуждаются гравитационно-инерционные волны с длинами волн $(L) 4d \text{ и } 2d$, где d - шаг сетки, то их энергия не будет переноситься и не будет реализован процесс геострофического приспособления. При длинах волн в диапазоне $2d \leq L \leq 4d$ групповая скорость будет иметь отрицательный знак, и энергия будет переноситься в противоположном направлении [18].

Для предотвращения такого эффекта, называемого вычислительная дисперсия волн, в модели WRF данные реанализа интерполируются на расштанную сетку Аракавы типа С (рис. 2.1). Сетка типа С имеет в четыре раза меньше переменных на единицу площади по сравнению с сеткой А. При таком расположении шаг сетки практически уменьшается вдвое, то есть допустимые области волновых чисел так же уменьшаются вдвое. Фактически это значит, что двухшаговые волны становятся четырехшаговыми, которые

лучше описываются на сетке [17]. Занижение фазовой и групповой скоростей происходит при любой аппроксимации системы уравнений гидродинамики атмосферы, но при описании процесса геострофического приспособления расшатанная сетка Аракавы типа C дает минимальное искажение по сравнению с другими типами сеток.

Для прогнозирования метеорологических полей используются схемы высоких порядков: двух и трех уровневые схемы по времени и двух и шести уровневые схемы прогноза адвекции, применяемые как по вертикали, так и по горизонтали. Для описания акустических и гравитационных волн используется маленький шаг по времени в схемах расщепления.

WRF с ядром ARW позволяет:

- 1) моделировать реальные и идеализированные случаи (выбор между которыми производится с помощью инициализации программы `real.exe` либо `ideal.exe` соответственно);
- 2) выбирать различные граничные условия по горизонтали и вертикали для реальных и идеализированных случаев;
- 3) настраивать модель для прогнозирования процессов различных характерных масштабов: от нескольких метров до тысяч километров.

2.1 Структура модели WRF

WRF состоит из нескольких блоков отвечающих за различные этапы моделирования: WPS, DA, Post-Processing, WRF-ARW (рис. 2.2).

2.1.1 Система предпроцессинга

WRF Preprocessing System (WPS) – система предпроцессинга – используется в первую очередь для проведения исследований на основе реальных данных

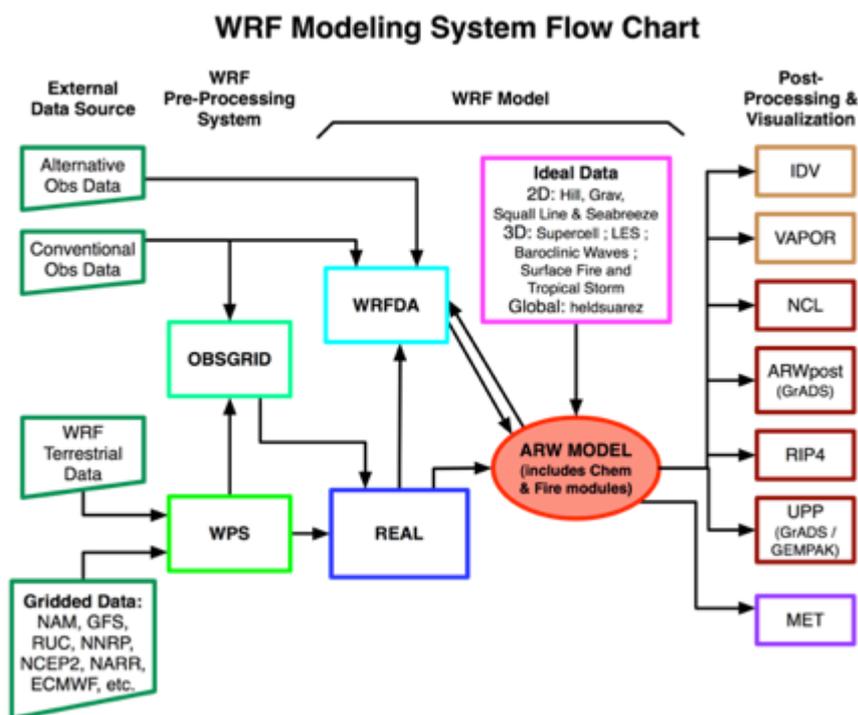


Рисунок 2.2 – Структура модели WRF [19]

Ее функции включают в себя:

- 1) определение областей моделирования;
- 2) интерполяцию данных о земной поверхности (таких как природные и антропогенные ландшафты, а также типы почв) на область моделирования;
- 3) перенос и интерполяцию метеорологических данных, являющихся результатом моделирования другой модели, обычно глобальной, на область моделирования.

Главные практические особенности системы предпроцессинга включают:

- 1) возможность выбора метеорологических данных различных форматов, обычно данные подаются в формате GRIB1 и GRIB2, с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ с различных метеоцентров;
- 2) возможность выбора одной из четырех картографических проекций – полярно-стереографической, Меркатора, равноугольной

проекции Ламберта и широтно-долготной – в зависимости от расположения области моделирования [19];

3) возможность создания вложенных сеток (например, для случаев, когда необходимо сравнить результаты моделирования, полученные с большим шагом сетки и с меньшим или для моделирования процессов небольших синоптических масштабов). Для этого в область с большим шагом сетки помещается подобласть с меньшим шагом сетки (рис. 2.3).

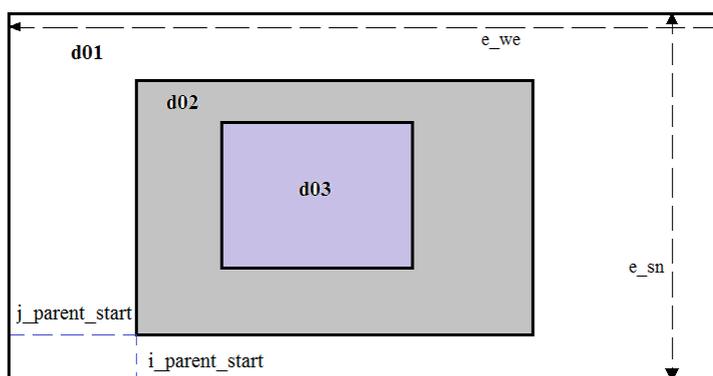


Рисунок 2.3 – Графическое представление некоторых параметров модели WRF [19]

2.1.2 Система ассимиляции данных

Блок WRF-DA (Data Assimilation) не является обязательным, однако его наличие может существенно улучшить результаты моделирования, позволяя включить в интерполяционный анализ системы предпроцессинга результаты наблюдений. Блок ассимиляции данных также может быть использован для обновления начальных условий при циклическом запуске модели WRF.

Главными функциями WRF-DA является:

1) трехмерная и четырехмерная вариационная ассимиляция данных, а также гибридная ассимиляция данных;

2) включение входных данных стационарных наблюдений в нескольких форматах (ASCII, PREPBUFR, OBSPOC), спутниковых данных в формате BUFR, радиолокационных данных в формате ASCII;

3) предоставление данных анализа на нерасштанной сетке Аракавы типа А; приращения, которые интерполируются на расштанную сетку Аракавы типа С и прибавляются к первому приближению для получения конечного анализа для модельной сетки WRF;

4) возможность обновления граничных условий модели после выполнения блока WRF-DA [19].

2.1.3 Система моделирования

WRF-ARW (Advanced Research WRF) – система моделирования – ключевой компонент системы WRF. Представляет собой динамическое ядро, состоящее из нескольких программ, подготавливающих моделирование по реальным или идеализированным данным, и программы численного интегрирования.

Отличительной особенностью ядра ARW от NMM является использование специфической вертикальной координаты η , которая через гидростатическую составляющую давления у земной поверхности связывается с рельефом [20].

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{P_{hs} - P_{ht}}, \quad (2.1)$$

где P_h – гидростатическая составляющая давления на высоте h ,

P_{ht} – гидростатическая составляющая давления у земной поверхности (меняется по горизонтали),

P_{hs} – гидростатическая составляющая давления на верхней границе атмосферы.

Если принять $P_{ht} = 0$, вертикальная система координат будет представлена формулой:

$$\eta = \frac{P_h}{P_{hs}}. \quad (2.2)$$

Впервые описать рельеф с помощью с помощью давления у земной поверхности предложил Лаприз в 1992 г., в его вертикальной системе координат (σ -системе) использовалось полное давление, а не гидростатическая составляющая.

Используемая во множестве гидростатических моделей атмосферы, вертикальная координата η , именуется массовой вертикальной координатой, поскольку приводит уравнение сохранения массы к дивергентному виду. Благодаря тому, что η имеет точно такую же зависимость от высоты, что и гидростатическая составляющая давления (формула 2.3) она заметно упрощает запись уравнений движения в дивергентной форме.

$$\frac{\partial \eta}{\partial z} = -\rho g, \quad (2.3)$$

Необходимость записи уравнений в дивергентной форме возникает при решении нелинейных уравнений соответствующими конечно-разностными схемами. Для решения таких уравнений пользуются понятием практической сходимости, когда расчеты проводятся многократно на сгущающейся сетке. Результат считается достоверным при сходимости расчетов к некоторому решению.

Чаще всего в нелинейных уравнениях переменные коэффициенты являются не гладкими и терпят разрыв. В таком случае, при аппроксимации, разностные операторы, имеющие определенный порядок аппроксимации на гладкой функции, на не гладкой или разрывной функции могут этого порядка не иметь. В результате решение может быть неверным, а сходимость – ложной.

Одним из двух подходов решения таких задач является использование консервативных конечно-разностных схем, основное свойство которых –

отражение на сетке тех же законов сохранения, которые присутствуют в исходной дифференциальной задаче. Свойство консервативности позволяет создать так называемые схемы сквозного счета, вид которых остается неизменным для задач рассматриваемого класса независимо от того, являются ли переменные коэффициенты в нелинейных уравнениях гладкими функциями или нет [21].

При дивергентной форме записи гидродинамические уравнения системы выражают законы сохранения искомым функций.

По горизонтали уравнения модели записываются в декартовой системе координат, являющейся оптимальной для решения мезомасштабных задач моделирования с использованием конечно-разностных схем. Таким образом, в дивергентной форме окончательная система уравнений гидродинамики, используемая в модели WRF, принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + m \left[\frac{\partial(Uu)}{\partial x} + \frac{\partial(Vu)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega u) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_d \alpha \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) \\ + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial \Phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \mu'_d \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = F_u, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + m \left[\frac{\partial(Uv)}{\partial x} + \frac{\partial(Vv)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega v) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_d \alpha \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) \\ + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial \Phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \mu'_d \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = F_v, \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} + m \left[\frac{\partial(Uw)}{\partial x} + \frac{\partial(Vw)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega w) \\ - \frac{g}{m} \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r) \right) + \frac{g}{m} \bar{\mu}_d = F_w, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial t} + \frac{1}{\mu_d} \left[m^2 \left(U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + V \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + m \Omega \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} - gW \right] = 0, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \bar{\mu}_d}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial(U)}{\partial x} + \frac{\partial(V)}{\partial y} \right] + m \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial(U\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial y} \right] + m \frac{\partial(\Omega\theta)}{\partial \eta} = F_\theta, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial(Uq_m)}{\partial x} + \frac{\partial(Vq_m)}{\partial y} \right] + m \frac{\partial(\Omega q_m)}{\partial \eta} = F_{Q_m}, \quad (2.10)$$

Система уравнений (2.4) – (2.10) замыкается диагностическими уравнениями гидростатики и возмущений соответственно, полученными из условия гидростатичности вертикальной координаты:

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \eta} = -\bar{\mu} \bar{\alpha}, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial \eta} = -\bar{\mu} \alpha' - \mu' \alpha, \quad (2.12)$$

и уравнением состояния:

$$p = \rho RT. \quad (2.13)$$

В системе уравнений (1) – (8) использованы следующие обозначения:

$$U, V, W \quad - \quad \text{компоненты скорости:} \quad U = \frac{\mu_d u}{m}, V = \frac{\mu_d v}{m}, \Omega = \frac{\mu_d \dot{\eta}}{m},$$

где μ_d – масса сухого воздуха в атмосферном столбе, введенная с учетом того, что вертикальная координата η определяется

относительно сухого воздуха;

m – масштабный множитель карты;

η – вертикальная скорость в орографических координатах;

α – Удельный объем влажного воздуха, в котором содержатся водяной пар и гидрометеоры;

$$\alpha = \alpha_d(1 + q_v + q_c + q_r + q_i + \dots)^{-1},$$

где q_m – отношения смеси водяного пара, облачности, дождя, льда и т. д.

α_d – объем сухого воздуха $\alpha_d = (1/\rho_d)$;

η – вертикальная скорость в орографических координатах;

Термодинамические переменные представлены в виде суммы среднего гидростатического значения и возмущений:

$$p = \bar{p}(z) + p', \Phi = \bar{\Phi}(z) + \Phi', \mu_d = \bar{\mu}_d(x, y) + \mu'_d,$$

где p – давление на уровне;

Φ – геопотенциальная высота на уровне z ;

$\Theta = \mu_d \Theta_m = \mu_d \Theta (1 + 1.6q_v)$ – потенциальная температура;

$Q_m = \mu_d Q_m, Q_m = q_v, q_c, q_r, q_i$ и т. д.

Зависимость фоновых значений давления, геопотенциала и удельного объема сухого воздуха от x, y, η не принимается во внимание.

Источники (стоки) в системе уравнений (2.4) – (2.10) представлены в общем виде – $F_{\text{общ}}$ [22].

2.1.4 Система постпроцессинга

Система постпроцессинга (WRF-Postprocessing) позволяет обрабатывать выходные файлы модели, обычно представляемые в формате NetCDF. С помощью программы ARWPost.exe можно получить интересующие трехмерные метеорологические поля на стандартных изобарических поверхностях в бинарном формате с разрешением .dat и файлов описания с разрешением .ctl, по которым с помощью программы

GRaDS (Grid Analysis and Display System, система анализа и визуализации сеточных данных) производится визуализация выходных метеополей. Пакет постпроцессинга MET (Model Evaluation Tool) позволяет проводить валидацию и верификацию модели [19].

2.2 Изменение конфигурации модели WRF

Ядро ARW предоставляет исследователю возможность опциональной настройки модели для решения интересующих задач с помощью конфигурационных файлов `namelist.wps` и `namelist.input`. В приложении №1 приведены примеры заполнения конфигурационных файлов применительно к цели данной работы.

2.2.1 Параметры списка вводимых переменных файла `namelist.wps`

Файл `namelist.wps` позволяет управлять конфигурацией программ `geogrid.exe`, `ungrib.exe`, `metgrid.exe`, которые вместе с программой `real.exe` (`ideal.exe`) представляют собой систему предпроцессинга модели.

Программа `geogrid.exe`

Основное назначение программы `geogrid.exe` – определение областей моделирования и интерполяция различных наземных данных на модельную сетку. Для определения областей моделирования используется информация, указанная в файле `namelist.wps` в разделе `&geogrid`, который состоит из 18 опций.

Опция `parent_id` содержит номер домена-родителя для каждой подобласти моделирования. При этом, первое число представляет собой номер домена `d_01` (с самым грубым пространственным разрешением) и должно быть равно единице.

Опция `parent_grid_ratio` отвечает за уровень вложенности дочернего домена по отношению к родителю. Для области с самым грубым разрешением параметр равен единице.

Для дочерних доменов наиболее часто на практике применяются значения $parent_grid_ratio = 3$ или $parent_grid_ratio = 5$. Установка $parent_grid_ratio = 3$ подразумевает, что на один шаг по времени в домене-родителе будет делаться три шага по времени в дочернем, чтобы сохранить скорость домена-родителя.

Параметры i_parent_start и j_parent_start представляют собой x и y координаты нижнего левого угла дочерней области в родительском домене; для домена с самым грубым разрешением (в дальнейшем будет обозначаться как d_01) оба параметра равны 1.

e_we и e_sn . Эти опции характеризуют количество точек по направлению с запада на восток (e_we) и с юга на север (e_sn) в области. Для вложенных сеток параметры должны быть на единицу больше и кратны числу $parent_grid_ratio$ соответствующей вложенной сетке, то есть:

$$e_{we} = n * parent_{grid_ratio} + 1, \quad (2.14)$$

где n – целое число.

Важные практические советы для определения этих параметров:

- 1) размер областей должен быть не меньше 100x100 точек;
- 2) в приграничной зоне должно находиться от пяти до десяти узлов с каждой стороны, поэтому дочерние области не должны быть слишком маленькими;
- 3) количество узлов сетки дочернего домена должно быть схожим с количеством узлов домена-родителя.

Также не стоит экономить на выборе размера области d_01 , поскольку увеличение ее размера в два раза увеличит время расчета только на 25%. Следует помнить, чем на более длительный срок делается прогноз, тем большими должны быть размеры горизонтальной области; поэтому для длительного прогнозирования метеополей на малой территории с высоким

разрешением лучше использовать вложенную сетку на большом родительском домене.

Опция `geog_data_res` отвечает за разрешение исходных данных, которое будет использовано при интерполяции статических данных о земной поверхности предоставляемых системами MODIS или USGS.

Начиная с версии модели WRF 3.8 в качестве статических данных о земной поверхности используется набор данных MODIS, если исследователя это устраивает, достаточно задать в параметре `geog_data_res` одно из значений: 10m (19 км), 5m (9 км), 2m (4 км), 30s (0.9 км). Для выбора в качестве статических данных о земной поверхности данных с системы USGS параметр `geog_data_res` определяется как:

$$geog_data_res = usgs_{n_r} + default, \quad (2.15)$$

где $n_r = 10'$ (19 км), $5'$ (9 км), $2'$ (4 км) или $30''$ (0.9 км).

На практике лучше использовать разрешение, которое немного выше, чем выбранное разрешение сетки.

Параметры `dx` и `dy` отвечают за шаг сетки по осям x и y , указываются в метрах для проекций Ламберта, полярно-стереографической или Меркатора и в градусах широты в широтно-долготной проекции (lat-lon). Достаточно указать только разрешение для домена `d_01`, для дочерних областей разрешение будет рассчитано автоматически в соответствии с параметром `parent_grid_ratio`. Также рекомендуется для проекций Ламберта, полярно-стереографической или Меркатора выбирать dx равным dy .

`map_proj` – строка, передающая информацию о проекции. Стандартный набор проекций для модели WRF-ARW: полярно-стереографическая (1) (polar), Ламберта (2) (lambert), Меркатора (3) (mercator) и широтно-долготная (4) (lat-lon) [19].

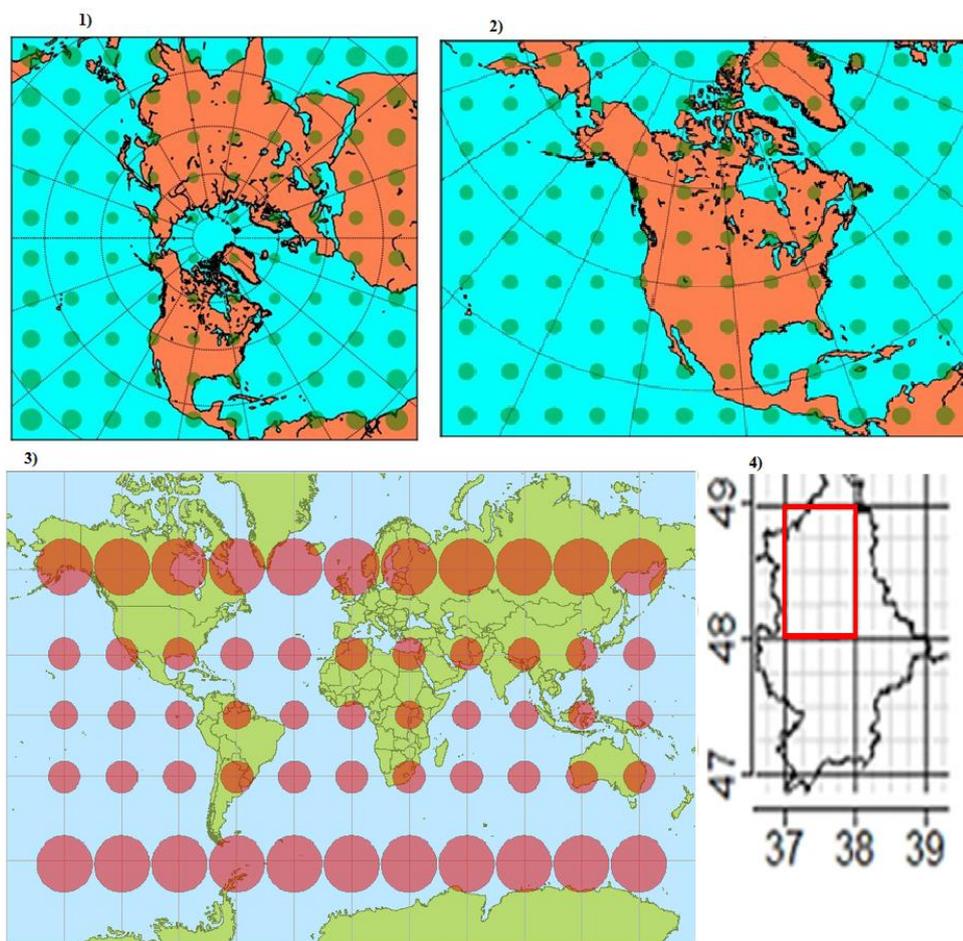


Рисунок 2.4 – Проекции, используемые в модели WRF [22]

Проекция Ламберта подходит для моделирования процессов в средних широтах, проекция не может содержать точки полюсов, а также не может быть периодической в направлении с запада на восток (то есть не может охватывать полностью весь круг широты).

Проекция Меркатора хорошо подходит для моделирования низкоширотных процессов. В отличие от проекции Ламберта может использоваться в качестве так называемого «канального домена» (полностью охватывать круг широты в направлении с запада на восток).

Полярная стереографическая проекция хорошо подходит для высокоширотных областей, особенно если они содержат точку полюса.

Цилиндрическая равноудаленная проекция (lat-lon) обязательно используется при моделировании на глобальной области, и при желании

может быть использована для моделирования на региональной области. Также эту проекцию применяют при использовании повернутой (rotated) системе координат: когда точку северного полюса сдвигают вдоль меридиана на некоторый угол.

Параметры `ref_lat` и `ref_lon` передают реальные значения широты и долготы области, чьи модельные координаты (i и j) известны. Для модели WRF-ARW значениями этих параметров обычно являются широта и долгота центра сетки с самым грубым горизонтальным разрешением [19].

В параметре `stand_lon` передается значение долготы, которая параллельна оси uv проекции Ламберта и полярно-стереографической; при установке этого параметра равным `ref_lon` сетка `d_01` будет находиться в центре.

`geog_data_path` указывает путь к месту, где хранятся статические данные о земной поверхности; на практике всегда лучше указывать абсолютный путь.

Заполнение строки `opt_geog_tbl_path` не обязательно, она указывает путь к файлу `GEOGRID.TBL` для параллельно скомпилированного кода.

Строка `opt_output_from_geog_path` указывает путь сохранения файлов `em_geog*`.

Программа ungrib.exe

В программе `ungrib.exe` происходит чтение GRIB файлов, их декодирование и запись данных в простом формате, называемом промежуточным форматом. Файлы GRIB содержат поля метеорологических величин в определенных моменты времени, которые обычно получают из других глобальных моделей, например GFS, NCEP, NAM, для обработки подходят как файлы формата GRIB1 и GRIB2 (опция выбирается при компиляции).

В файле `namelist.wps` программе `ungrib.exe` можно передать два параметра:

1) `out_format` задает формат промежуточного файла (если программа запускается в системе предпроцессинга, параметр должен быть установлен на 'WPS', другими параметрами являются 'MM5' или 'SI');

2) опция `prefix` позволяет выбрать любой префикс, который будет присвоен промежуточным файлам, если необходимо запускать программу `ungrib.exe` несколько раз в системе WPS либо оставить по умолчанию: 'FILE' [19].

Программа metgrid.exe

Программа `metgrid.exe` интерполирует по горизонтали метеорологические данные промежуточного формата, полученного после работы программы `ungrib.exe`, на область моделирования, полученную после работы программы `geogrid.exe`. В конфигурационном файле `namelist.wps` в разделе `&metgrid` содержится пять параметров.

Параметр `fg_name` содержит префикс, который был задан в разделе `&ungribprefix`. Если нужно объединить данные, полученные при нескольких последовательных запусках программы `ungrib.exe`, то префиксы перечисляются через запятую.

`constants_name` – необязательный к заполнению параметр, указывающий путь и полное имя файлов промежуточного формата, которые не меняются во времени. По умолчанию задается как пустой список (без постоянных полей).

`io_form_metgrid` определяет выходной формат файлов `met_em*`; может принимать значения от 1 до 3, где 1 – бинарный формат, 2 – NetCDF, 3 - .GRIB1. Программа `real.exe` ожидает формата NetCDF, поэтому нет нужды менять этот параметр без необходимости.

Последние два параметра в разделе `&metgrid` аналогичны параметрам `opt_geog_tbl_path` и `opt_output_from_geog_path`, описанным в разделе `&geogrid` [19].

2.2.2 Параметры списка вводимых переменных файла namelist.input

В конфигурационном файле namelist.input содержатся параметры для управления программами real.exe, wrf.exe, tc.exe, ndown.exe, которые запускают саму модель WRF. Параметров достаточно много, и некоторые из них повторяют параметры, описанные в namelist.wps либо являются интуитивно понятными, поэтому далее будут описаны только некоторые наиболее важные опции.

В разделе &time_control стоит заострить внимание на параметре frames_per_outfile, отвечающем за то, какое количество временных периодов будет записано в один выходной файл. Для стационарных доменных областей значение обычно устанавливается на 1000 (чтобы все временные периоды помещались в один файл прогноза), а если домен движущийся – параметр задается равным единице для корректной визуализации пространственных областей. Формат выходных файлов также можно выбрать самостоятельно с помощью параметра io_form_history, который может принимать значения:

- 1) 2 = netCDF;
- 2) 1 = бинарный формат;
- 3) 4 = PHDF5 формат;
- 4) 5 = GRIB1 формат;
- 5) 10 = GRIB2 формат;
- 6) 11 = параллельный netCDF формат;
- 7) 102 = разделенный netCDF (не поддерживается системой

постпроцессинга ARW).

Рекомендуется оставлять значение по умолчанию:

io_form_history = 2.

В разделе &domains появляется параметр e_vert, позволяющий указать количество вертикальных уровней, на которых будет производиться интерполяция при выполнении программы real.exe; то количество должно быть одинаковым для каждой области. Программой real.exe будут

рассчитаны необходимые уровни, близкие к стандартным изобарическим поверхностям по количеству заданных уровней. Количество уровней лучше задавать не менее 35, оптимально от 40-60.



Рисунок 2.5 –Блок-схема процессов, которые требуют параметризации в модели WRF

В разделах `&physics` и `&dynamics` можно задать различные схемы параметризации:

- микрофизики облаков;
- подстилающей поверхности;
- пограничного слоя;
- радиации (коротко- и длинноволновой);
- облачности.

Нумерация опций параметров обычно распределяется от простых к сложным (требующим больших вычислительных затрат). Опции содержат как недавно разработанные схемы, так и хорошо исследованные, которые используются в оперативных моделях прогноза погоды много лет [19].

`mp_physics` – параметр, задающий схему расчета микрофизики; если разным прогностическим областям задать разные схемы расчета

микрофизики, то моделью будет выбрана наиболее сложная и применена ко всем доменам. На практике простые схемы используются для моделирования областей с низким пространственным разрешением и сложные – для областей с высоким пространственным разрешением.

`ra_lw_physics` определяет схему расчета восходящих и нисходящих потоков длинноволновой радиации при ясном и облачном небе, значение должно быть одинаковым для всех доменов.

`ra_sw_physics` определяет схему расчета солнечных потоков при ясном и облачном небе, как и предыдущий параметр должен быть одинаковым для всех доменов.

`radt` – параметр, задающий количество минут модельного времени между вызовами параметризации радиации; на практике задается равным одной минуте на 1 км расстояния dx :

$$radt = dx(\text{в км}). \quad (2.16)$$

`sf_sfclay_physics` – опция параметризации физики земной поверхности.

`sf_surface_physics` – опция, отвечающая за схему параметризации модели земной поверхности. В схеме количество уровней почвы должно соответствовать количеству уровней почвы указанному в параметре `num_soil_layers`.

`bl_pbl_physics` – опция выбора схемы параметризации пограничного слоя, также при необходимости увеличивающая высоту пограничного слоя. Используется для доменов, шаг сетки которых превышает 500 м.

`bldt` – количество минут модельного времени между вызовами схемы параметризации пограничного слоя, рекомендуется задавать равным нулю, то есть для каждого шага по времени.

Опция `cu_physics` отвечает за выбор схемы параметризации кучевых облаков, полезна при шаге сетки более 10 км и не работает при шаге сетки менее 4 км.

`cutd` - количество минут модельного времени между вызовами схемы параметризации кучевой облачности.

`ifsnw` – опция, позволяющая отключить моделирование эффектов, связанных со снежным покровом для простой модели почвы.

`surface_input_source` – указывает, из каких файлов будут получены данные о почве и землепользовании. Может принимать три значения:

1 – данные с пересчитанными доминирующими категориями земной поверхности и почвы из WPS/geogrid;

2 – данные формата GRIB из другой прогностической модели (возможно только при нахождении категорий VEGCAT/SOILCAT в файлах `met_em*`);

3 - использование не пересчитанных доминирующих категорий земной поверхности и почвы из WPS/geogrid (является значением по умолчанию с версии модели WRF 3.8)

`num_land_cat` – опция, отвечающая за количество категорий поверхности во входных файлах (значение должно соответствовать тому, что получено после работы программы `geogrid.exe`)

`sf_urban_physics` — параметр, определяющий степень воздействия городов на атмосферу.

`sf_ocean_physics` — параметр, не требующий обязательного заполнения, который определяет модель океана, используемую при моделировании.

Опции раздела `&dynamics`

`w_damping` — опция включения либо выключения затухания вертикальной скорости (обязательна к использованию при моделировании с реальными начальными условиями).

`diff_opt` отвечает за выбор схемы параметризации турбулентного перемешивания.

`km_opt`— параметр, в котором задается коэффициент турбулентного перемешивания.

`base_temp` — опция, отвечающая за задание базовой температуры поверхности моря, которая при правильной установке может улучшить результаты моделирования. В случае, если верхняя граница модели находится на уровне выше 20 км (50 гПа), задается как типичная температура на уровне моря в середине области моделирования и может варьироваться от 280К до 300К.

`moist_adv_opt` — параметр, позволяющий задать адвекцию положительно (1) или монотонно (2), для регулировки результатов при излишнем или недостаточном прогнозировании влаги.

Таким образом, модель WRF-ARW является достаточно физически и математически обоснованной, а также имеет большие возможности пользовательской настройки, что дает возможность ее применения для широкого спектра задач моделирования гидродинамических процессов. Однако, не стоит забывать, что для нахождения оптимальной конфигурации модели должна проводиться ее верификация при разных наборах параметров в списках вводимых переменных.

3 Оценка пожарной опасности по условиям погоды

Для исследования прогноза пожароопасности с помощью комплексных показателей пожарной опасности была выбрана Европейская территория России (ЕТР). Выбор данной территории представляется актуальным в связи с высокой плотностью населения в этой части страны и увеличивающимся год от года развитием территории, что требует составления точных прогнозов пожароопасности для уменьшения и предотвращения ущерба, наносимого как людям, так и природным экосистемам.

3.1 Расчет индексов пожарной опасности с помощью данных реанализа

Самым простым вариантом получения пространственно регулярных данных об изменении метеопараметров необходимых для расчета КППО является использование данных глобального реанализа. Существует несколько глобальных реанализов от национальных центров и агентств по исследованию атмосферы. Все они имеют разное пространственное разрешение (от $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ до $0,25^\circ \times 0,25^\circ$), рассчитаны для разных временных периодов и включают в себя большинство используемых в моделировании метеопараметров.

Для данного исследования был выбран реанализ Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) ERA-Interim, который является самым свежим из предоставленных ECMWF. Реанализ ERA-Interim охватывает период с 1 января 1989 г. по настоящее время, и на данный момент планируется расширение этого периода до 1979 г. Сеточные данные включают большой набор приземных параметров с временным разрешением 3 часа, и параметров на высотах тропосферы и стратосферы с временным разрешением 6 часов. Новый реанализ был создан для того чтобы, уменьшить или если это возможно то полностью исключить некоторые

проблемы, возникшие при предоставлении сеточных данных предыдущей системой реанализа ERA-40, в основном связанные с описанием гидрологического цикла и стратосферной циркуляции.

Одним из основных требований к системе реанализа является физическая согласованность, означающая, что выходные параметры должны быть согласованы как с физическими законами, так и с результатами наблюдений. Это определяющее свойство реанализа, что отличает его от других методов оценки гидродинамических параметров. Это требование достигается путем использования прогностической модели в качестве объединяющего звена, где происходит ассимиляция данных наблюдений и данных, полученных из других источников. Например, значения осадков по результатам наблюдений дополняются осадками, рассчитанными на основе реанализа температуры, влажности и параметров ветра.

По сравнению с продукцией реанализа ERA-40, в ERA-Interim был улучшен учет осадков. В реанализе ERA-40 проблема заключалась в неточной формализации схемы анализа влажности и учете микроволновой радиации для расчета общего количества влаги в атмосфере, количество которой изменилось после извержения вулкана Пинатубо, что не было предусмотрено в реанализе. В результате количество осадков по данным реанализа ERA-40 было завышено в районе океанских тропиков и занижено в остальных областях. В реанализе ERA-Interim большая надежность была назначена данным наблюдений, чем значениям осадков, рассчитанным на основании данных о микроволновой радиации. В результате количество осадков над сушей увеличилось по сравнению с реанализом ERA-40 однако в некоторых областях осталось заниженным, особенно в горных районах [23].

В качестве начальных данных для расчета индексов пожарной опасности по условиям погоды из реанализа были получены значения температуры, температуры точки росы, выпавших осадков и скорости ветра на регулярной сетке с шагом 1° для области от 50° с.ш. до 70° с.ш. и от 20° в.д.

до 60° в.д. Временной интервал между сроками для полей температуры, температуры точки росы, скорости ветра составляет 6 часов, а для полей выпавших осадков – 12 часов.

Однако в результате перечисленных выше особенностей полей метеорологических характеристик, восстановленных с помощью реанализа, получить правдоподобные значения индексов пожароопасности по условиям погоды не удалось. Это связано с тем, что КППО представляют собой накопленные значения показателя за каждый день, обнуляясь в случае выпадения порогового количества осадков. Так как учет осадков в реанализе был произведен приближенно и в большинстве случаев занижен, то обнуление индексов не происходило. В результате, если в начале пожароопасного сезона, несмотря на большой горизонтальный шаг сетки, можно увидеть общую тенденцию распределения классов пожарной опасности, то к концу пожароопасного сезона область прогноза представляет собой ровное поле с чрезвычайной пожарной опасностью, что не является достоверным (рис. 3.1).

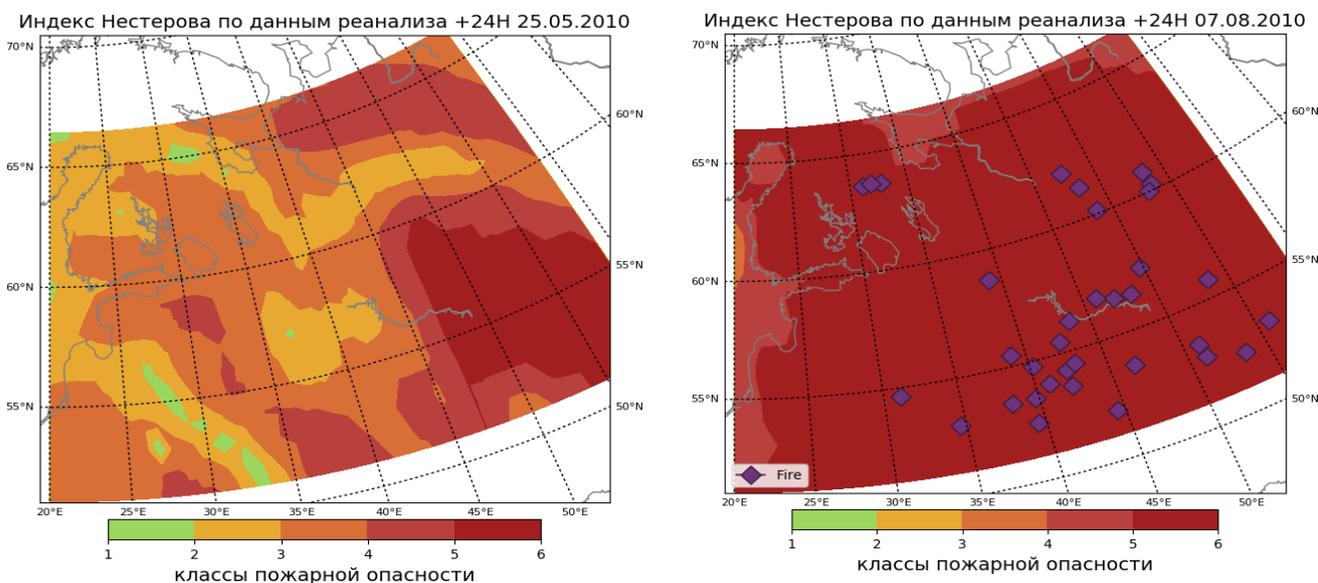


Рисунок 3.1 – Прогноз пожароопасности по условиям погоды на основе данных реанализа в начале пожароопасного сезона (слева) и в конце (справа)

Таким образом, прогноз метеорологических полей проводился для каждого дня пожароопасного сезона, начиная с 1 мая 2010 г. и заканчивая 30 сентября 2010 г. Прогноз рассчитывался на сутки с интервалом в 6 часов, начиная от 12 часов текущего дня; горизонтальный шаг сетки составлял 15 км. Так как область расчета лежит в высоких широтах для моделирования использовалась полярно-стереографическая проекция. В качестве начальных и граничных условий использовались данные реанализа Национального центра экологического прогнозирования (NCEP) с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Моделирование было необходимо произвести для каждого дня пожароопасного сезона, то есть 153 раза, поэтому данный процесс был автоматизирован с помощью написания соответствующих программ на языке FORTRAN, контроль над запуском которых был осуществлен с помощью bash-скрипта. Выходные файлы модели, получаемые в формате NetCDF, затем были конвертированы с помощью программы постпроцессинга ARWPost.exe в бинарные файлы с разрешением .dat. Считывание требуемых массивов для расчета индексов пожарной опасности производилось напрямую, с помощью программы написанной на языке FORTRAN, в которой также производился расчет индексов пожарной опасности для каждого дня пожароопасного сезона. Полученные результаты за каждый день записывались в выходные текстовые файлы, содержащие 5 колонок: id широты и долготы, сами значения широты и долготы и значения индекса пожарной опасности, соответствующие указанным координатам.

Так как моделирование производилось в высоких широтах, встал вопрос о корректной визуализации полученных полей КППО. Стандартный программный комплекс для визуализации GRaDs искажает область с результатами расчета в высоких широтах и имеет ограниченные возможности интерполяции. В связи с этим было принято решение проводить визуализацию и все дальнейшие расчеты на языке Python. Несмотря на свою простоту, Python на данный момент является одним из самых быстроразвивающихся языков программирования, а наличие

подробной документации и возможность простого подключения специальных модулей, предназначенных для решения конкретных задач, делают его привлекательным для научного использования.

Поскольку КППО нужно представить в виде классов для оценки конечного результата прогноза пожарной опасности, то сначала была проведена нормализация в соответствии с принадлежащими каждому индексу шкалами. Комплексному показателю пожарной опасности Здеревой на данном этапе исследования была установлена в соответствие шкала пожарной опасности Нестерова. В связи с тем, что шаги по пространству при моделировании производились в километрах, а результирующие координаты предоставлялись в градусах широты и долготы, сетка получилась неравномерной. Поэтому перед визуализацией данные были линейно интерполированы на регулярную широтно-долготную сетку с горизонтальным шагом $0,1^\circ$, что составляет чуть меньше 15 км. Нормализованные индексы пожарной опасности были визуализированы на азимутальной равноудаленной проекции, цветовая шкала классов пожарной опасности была создана непосредственно для данного исследования.

Для того чтобы оценить насколько хорошо моделью WRF прогнозировались осадки и происходило ли своевременное сбрасывание индексов пожарной опасности, для визуализации был выбран конец пожароопасного сезона – август.

После того как графическая обработка результатов расчета КППО была завершена, встал вопрос об оценке качества этих результатов, а именно, что считать за фактические значения пожарной опасности. В качестве первого варианта была предпринята попытка сбора данных наблюдений с метеостанций для всей Европейской территории России с сайта <https://rp5.ru>, по которым затем рассчитывались индексы пожароопасности, а в конце проводилась линейная интерполяция на всю ЕТР. Однако такой подход дал достаточно обобщенное прогностическое поле, сравнимое с результатами по

данным реанализа, и значительно хуже отображающего пожароопасную ситуацию, чем поле, полученное по результатам прогноза WRF (рис. 3.3).

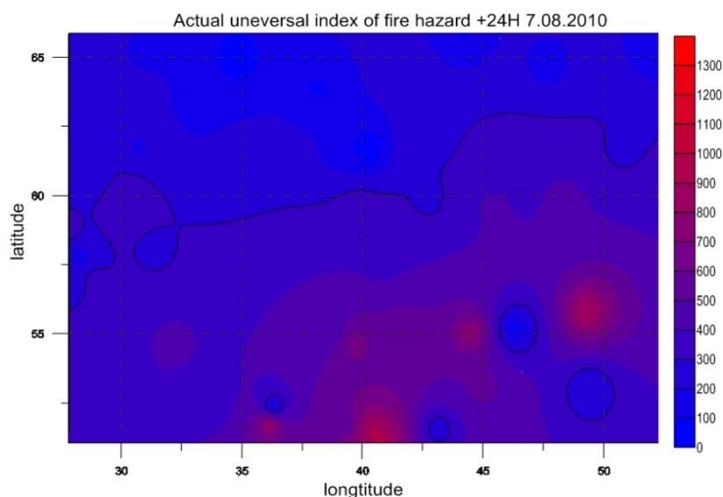


Рисунок 3.3 – Фактическая пожарная опасность, рассчитанная по данным наблюдений с метеостанций

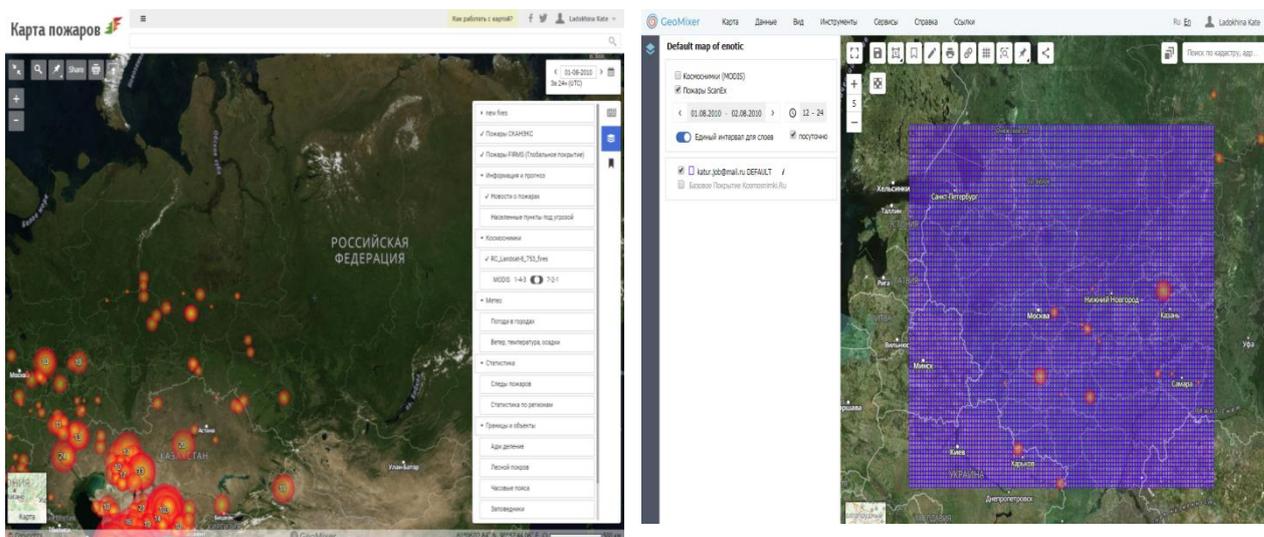


Рисунок 3.4 – Пример карты пожаров с сайта <http://fires.ru> и работы с ГИС GeoMixer соответственно

Второй вариант подразумевал получение данных о фактически произошедших возгораниях и сопоставление их с прогностическими полями пожарной опасности. Данные об очагах пожаров были получены с сайта <http://fires.ru/>, который при регистрации дает доступ к мощному онлайн ГИС

инструменту GeoMixer, где относительно быстро можно сформировать текстовые файлы с координатами очагов пожаров (рис. 3.4). Эти данные были нанесены в виде маркеров на прогностические карты для первичной визуальной оценки успешности прогноза пожарной опасности по данным WRF (рис. 3.5).

3.3 Оценка качества прогноза пожарной опасности по результатам гидродинамического моделирования

3.3.1 Визуальная верификация

Несмотря на субъективность метода визуальной верификации, он является одним из самых эффективных, поскольку мозг человека обладает способностью быстрого выявления различий и сходств между некими объектами [24]. Поэтому сначала была проведена визуальная оценка качества прогноза пожарной опасности по условиям погоды на основе прогностических данных модели WRF.

В условиях высокой пожарной опасности все индексы достаточно хорошо предсказывают области возможных возгораний, при этом как общей тенденции концентрации пожаров, так и очагов, расположенных достаточно далеко от основной зоны высокой пожароопасности. Однако существуют некоторые различия, которые позволяют судить о лучшей или худшей успешности прогноза ПО с помощью того или иного индекса относительно остальных.

В качестве примера оценки точности прогноза высокой пожароопасности была выбрана дата 11.08.2010, когда очаги возгораний наблюдались не только в климатически предрасположенных к их появлению районах юго-восточной части ЕТР, но на северо-западе (Приложение №2).

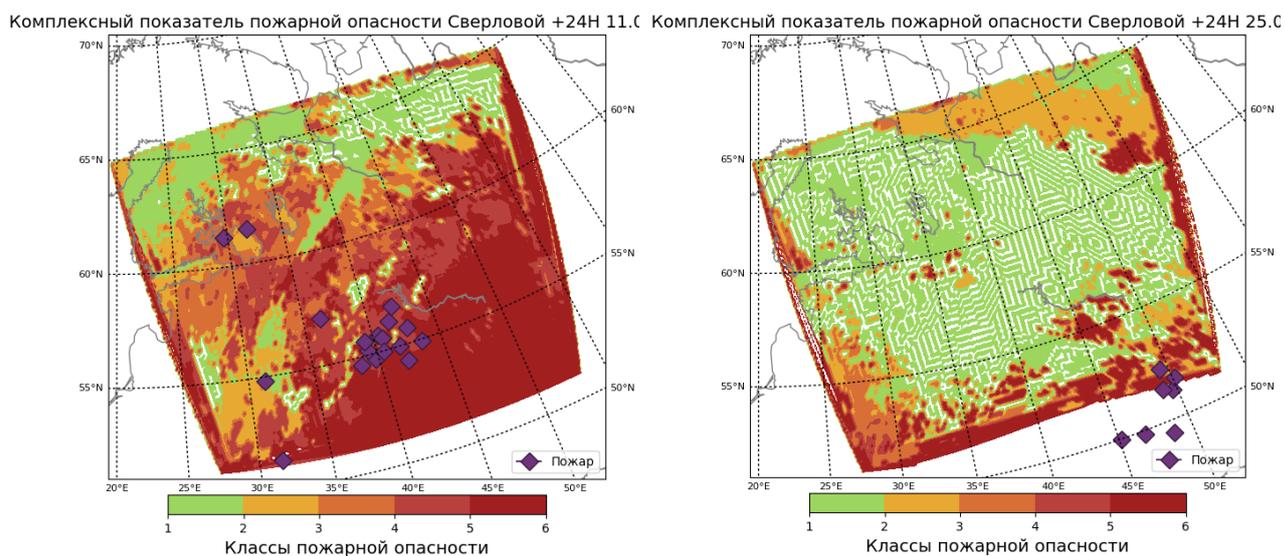


Рисунок 3.5 – Визуализация прогноза пожарной опасности на примере КППО Свердловской

Индекс Нестерова успешно спрогнозировал большинство пожаров на юге области, однако занижил пожароопасность на северо-западе. Индексы Софронова с поправкой на гигроскопичность лесных горючих материалов в условиях высокой степени пожарной опасности дают практически одинаковые результаты: хорошо отображают пожароопасность на юге ЕТР и на северо-западе прогностической области. КППО Телицына дает наиболее обобщенную картину пожароопасности в связи со шкалой, состоящей из четырех классов пожарной опасности в отличие от шкалы Нестерова, состоящей из пяти. Высокая пожароопасность, рассчитанная по индексу Телицына, отображается корректно, но количество ошибок второго рода будет гораздо выше, по сравнению с другими индексами. КППО Свердловской завышает пожарную опасность на юге ЕТР, зато лучше остальных отображает пожарную опасность на северо-западе прогностической области, прогнозируя высокую ПОВ районе возгораний и малую и среднюю там, где возгораний не происходило (рис. №); это значит, что количество ошибок второго рода будет меньше по сравнению с остальными индексами. Показатель Здеревой несмотря на существенное отличие формулы расчета от всех остальных индексов, также хорошо отображает высокую

пожароопасность на юге прогностической области, однако проведенная нормализация шкалы пожарной опасности в соответствии с индексом Нестерова, привела к занижению ПО на северо-западе ЕТР.

В качестве примера оценки точности прогноза высокой пожароопасности была выбрана дата 25.08.2010, когда очаги возгораний наблюдались не только в небольшом районе на юго-востоке ЕТР.

В условиях низкой пожарной опасности индекс Сверловой также оказался лучше остальных, так как единственный спрогнозировал чрезвычайный уровень пожарной опасности в местах фактических возгораний. Ближе всего к этому результату приблизились индексы Софронова, однако прогностическая пожароопасность оказалась все равно не достаточно высокой. Несмотря на то, что индекс Телицына должен показывать более обобщенную пожароопасную ситуацию по сравнению с другими, в случае с низкой пожароопасностью этого не происходит, в районе, где наблюдались пожары, появляется «очаговость», и в целом пожароопасность занижена. Как стало ясно после оценки КППО Здеревой в условиях высокой пожарной опасности, этот индекс занижает ПО, однако подбор других шкал пожароопасности может значительно повысить качество прогноза пожароопасности с помощью этого индекса.

Таким образом, по результатам визуальной верификации, лучшим показателем для прогноза пожарной опасности по условиям погоды является КППО Сверловой.

3.3.2 Статистическая верификация

Несмотря на то, что метод визуальной верификации является достаточно эффективным, он не объективен, поскольку зависит от восприятия конкретного исследователя. Статистические методы верификации дают объективную оценку качества прогноза. К таким методам относится верификация с помощью критериев успешности.

Для оценки по данному методу составляется матрица сопряженности фактических и прогностических результатов размером 2x2 (таблица 3.1). В ячейку n_{11} заносится число случаев, когда явление прогнозировалось и наблюдалось, в ячейку n_{12} - когда явление прогнозировалось, но не наблюдалось, это и есть так называемые ошибки второго рода или «ошибки-страховки». В ячейку n_{21} записывается число случаев, когда явление не прогнозировалось, но наблюдалось, это ошибки первого рода или «ошибки-пропуски»; в большинстве случаев последствия при допуске ошибки первого рода намного серьезней, чем при допуске ошибки второго рода. В ячейке n_{22} помещается количество случаев, когда явление не прогнозировалось и не наблюдалось. Во вспомогательные ячейки заносятся следующие значения: в ячейку n_{10} - количество спрогнозированных случаев наличия явления, в ячейку n_{20} - количество спрогнозированных случаев отсутствия явления. Ячейка n_{01} представляет количество фактически произошедших явлений, а ячейка n_{02} - количество фактического отсутствия явления. N - сумма значений во всех ячейках[25].

Таблица 3.1 – Матрица сопряженности прогноза [25]

	Явление наблюдалось	Явление не наблюдалось	
Явление прогнозировалось	n_{11}	n_{12}	n_{10}
Явление не прогнозировалось	n_{21}	n_{22}	n_{20}
	n_{01}	n_{02}	N

В качестве прогностических данных в этом исследовании используются поля прогностической пожароопасности, а в качестве фактических данных – координаты очагов возгораний. Но пожар – явление

не точечное. Оно имеет свою площадь, поэтому для большего правдоподобия очаги пожаров были представлены как горизонтальные области размером $0,6^\circ \times 0,6^\circ$, в которых пожароопасность была выше или равна 4 классу. С помощью матрицы сопряженности были рассчитаны следующие показатели успешности [24]:

- 1) общая оправдываемость прогноза:

$$P_{\text{общ}} = \frac{n_{11} + n_{22}}{N}, \quad (3.1)$$

- 2) критический индекс успешности:

$$TS = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{21} + n_{12}}, \quad (3.2)$$

- 3) оценка смещения:

$$BIAS = \frac{n_{11} + n_{12}}{n_{11} + n_{21}}, \quad (3.3)$$

отношение спрогнозированного количества случаев высокой пожароопасности к фактически произошедшим возгораниям;

- 4) вероятность обнаружения:

$$POD = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{21}}, \quad (3.4)$$

доля наблюдаемых событий, которые были спрогнозированы;

- 5) вероятность ошибок второго рода:

$$FAR = \frac{n_{12}}{n_{11} + n_{12}}. \quad (3.5)$$

доля спрогнозированных, но не наблюдавшихся событий.

Из анализа формул (3.1) – (3.5) следует, что для идеального прогноза общая оправдываемость прогноза, критический индекс успешности, оценка смещения и вероятность обнаружения равны 1, а вероятность ошибок второго рода равна 0.

Результаты расчета критериев успешности для разных индексов были сведены в следующие таблицы:

Таблица 3.1– Критерии успешности прогноза пожароопасности за май 2010 г.

КППО \ Критерий	BIAS	POD	FAR	TS	P _{общ}
Нестерова	875	0,854	0,997	0,0033	0,855
Сверловой	2443	0,989	0,999	0,0009	0,371
Софронова(1)	1067	0,871	0,997	0,0028	0,799
Софронова(2)	1113	0,874	0,997	0,0026	0,784
Телицына	3150	0,826	0,999	0,0011	0,575
Здеревой	824	0,849	0,997	0,0035	0,875

Таблица 3.2 – Критерии успешности прогноза пожароопасности за август 2010 г.

КППО \ Критерий	BIAS	POD	FAR	TS	P _{общ}
Нестерова	539	0,797	0,996	0,0037	0,856
Сверловой	1540	0,959	0,998	0,0017	0,375
Софронова(1)	696	0,847	0,997	0,0031	0,799
Софронова(2)	681	0,853	0,997	0,0031	0,784
Телицына	1831	0,874	0,998	0,0018	0,575
Здеревой	822	0,775	0,932	0,0035	0,875

Помня о неудачной попытке расчета показателей пожарной опасности по результатам реанализа, было произведено сравнение критериев успешности, рассчитанных для начала (май) и окончания (август) пожароопасного периода (таблицы 3.1 и 3.2 соответственно). Значения критериев успешности за май и за август заметно совпадают, что говорит о том, что прогноз осадков моделью WRF выполнен корректно.

Пожароопасность – вероятность возникновения пожаров, не эквивалентна самим случаям возгорания, поэтому оценка смещения (BIAS) у всех КППО намного больше единицы. Из анализа оценки смещения следует, что сильнее всего завышают пожароопасность индексы Телицына, за счет того, что его шкала более грубая по сравнению с остальными индексами, и Сверловой, за счет поправки на скорость ветра и динамического учета порогового значения выпавших осадков. Вероятность обжигания (POD) выше 0,8 у всех критериев кроме индексов Нестерова и Здеревой (чья шкала была проградуирована в соответствии со шкалой пожарной опасности Нестерова), из чего следует, что эти индексы занижают пожароопасность.

В результате анализа оценки смещения было установлено, что индексы Телицына и Сверловой завышают пожароопасность, из чего следует, что вероятность обнаружения пожара у этих показателей будет выше, чем у остальных. Этот вывод подтверждается данными таблицы критериев успешности, однако индекс Сверловой на 8,5% лучше обнаруживает пожары, чем индекс Телицына, поэтому завышение им пожарной опасности более оправдано. Выводы о том, что количество ошибок второго рода а следовательно и случаев завышения пожарной опасности наибольшее у индексов Телицына и Сверловой и наименьшее у показателей Нестерова и Здеревой, подтверждено результатами расчета критерия FAR. Однако значения вероятности ошибок второго рода у индекса Здеревой на 6% ниже, чем у КППО Нестерова и остальных, а значит, у индекса Здеревой меньше «ошибок-страховок», что позволяет сэкономить ресурсы на мерах защиты от пожаров.

После анализа трех критериев успешности, результаты расчета критического индекса успешности выглядят закономерно: наиболее высокие значения у КППО Нестерова и Здеревой, а самые низкие – у КППО Телицына и Сверловой. Такие же выводы можно сделать и после анализа результатов расчета общей оправдываемости прогноза пожарной опасности разными индексами. Показатели Софронова по результатам оценки успешности прогноза ПО находятся посередине между индексами, которые завышают, и индексами, которые занижают пожароопасность. Таким образом, индексы Софронова представляют собой оптимальный вариант для прогноза пожарной опасности. Однако последствия пожаров могут быть и зачастую оказываются катастрофическими, в связи с этим, затраты на дополнительные меры защиты от этого опасного явления могут быть оправданы. Исходя из этого, лучшим индексом для прогноза пожарной опасности является КППО Сверловой.

3.3.3 Диагностические методы верификации результатов прогноза

Как показал анализ, визуальный и статистический методы верификации прогноза имеют свои преимущества и недостатки. Но существует и третья группа методов верификации, которая дает более подробную информацию о характере ошибок, чем статистическая, и при этом является объективной в отличие от визуальной верификации.

Эти методы верификации носят название диагностических. Они являются более сложными, чем статистические, поэтому чаще используются в исследованиях, чем в оперативной практике. К диагностическим методам относится, например, составление матрицы сопряженности, состоящей не из двух, а из K категорий, которая предоставляет больше информации об ошибках прогноза, включая относительную вероятность возникновения малых ошибок по сравнению с большими.

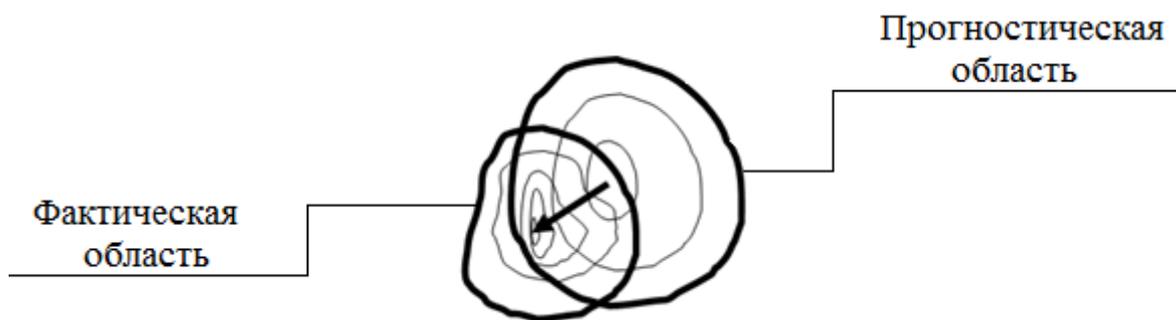


Рисунок 3.6 – Принцип работы объектного метода верификации

Еще один диагностический метод оценки качества прогноза называется объектный метод. Принцип его работы схематично изображен на рисунке №: происходит сопоставление положения и формы спрогнозированного площадного объекта с фактически наблюдаемым. Этот метод обычно применяется для сравнения осадков, смоделированных гидродинамической моделью, со спутниковыми данными, но он также может оказаться полезным при оценке качества прогноза пожарной опасности. Среди критериев оценки успешности прогноза объектным методом наибольший интерес будут представлять ошибки местоположения, разница площадей фактического и спрогнозированного объектов и корреляция между значениями прогнозируемого объекта со скорректированным местоположением и фактически наблюдаемым объектом.

Форма и соответственно площадь объектов задается при установке порогового значения исследуемой характеристики, которое может быть как низким для захвата большинства значений характеристики, так и высоким для оценки только максимальных значений объектов. Ошибка местоположения определяется путем поиска минимальных различий между значениями фактического и прогностического объектов при их сопоставлении; поиск происходит до тех пор, пока не будет удовлетворен критерий наилучшего соответствия. Критерий наилучшего соответствия может быть определен по методу:

- наименьших квадратов,
- максимальной корреляции,
- максимального перекрытия.

Недостатком метода объектной верификации является вероятность отсутствия связи между наблюдаемым и прогнозируемым объектами, в результате чего их не удастся сопоставить между собой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, вопрос разработки прогноза пожароопасности в связи с серьезными разрушительными последствиями этого явления остается открытым. Погодные условия в значительной степени влияют на образование и распространение пожаров, поэтому прогноз пожароопасности по условиям погоды на основании результатов гидродинамического моделирования является актуальной задачей.

В результате проведенного исследования были решены следующие задачи:

1. Изучить разработанные на данный момент методики прогноза пожарной опасности по условиям погоды.
2. Изучить методику гидродинамического прогноза с использованием мезомасштабной модели гидродинамической модели WRF.
3. С помощью модели WRF получить требуемые для прогноза пожароопасности метеорологические характеристики для выбранного периода времени.
4. Выработать критерии, подходящие для прогноза пожароопасности по результатам прогноза модели.
5. Создать алгоритм расчета и визуализации выбранных критериев прогноза пожароопасности.
6. Провести анализ спрогнозированной и фактической пожароопасной обстановки и сделать выводы о том, какой из критериев наиболее достоверно прогнозирует пожароопасность для выбранного периода.

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы:

- в условиях высокой пожарной опасности, ее прогноз с помощью КППО на основании результатов прогноза

метеорологических характеристик моделью WRF, дает хорошие результаты, согласующиеся с фактически наблюдаемыми очагами возгораний;

- по результатам визуальной и статистической верификаций, лучше всех высокую пожароопасность прогнозирует индекс Сверловой с поправкой на скорость ветра при условии оправданности затрат на дополнительные меры защиты от пожаров;

- на основании того, что индекс Здеревой является наиболее физически обоснованным среди всех рассмотренных КППО, с помощью него можно успешнее спрогнозировать пожароопасность при более тщательном подборе градаций классов пожарной опасности.

В дальнейшем будет проведена оценка качества прогноза с помощью диагностических методов верификации, а также, основываясь на результатах объектной верификации, будет подобрана и испытана новая шкала классов пожарной опасности для индекса Здеревой. Так как антропогенный фактор на данный момент является основной причиной пожаров, будет предпринята попытка расчета комплексных показателей пожарной опасности с учетом антропогенной нагрузки путем введения весовых коэффициентов, зависящих от дня недели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шерстюков Б. Г. Лесные пожары, как метеообусловленное явление //Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2012. – №. 176. – С. 326-357.
2. Щетинский Е. А. Тушение лесных пожаров. – М. : Всерос. науч.-исслед. и информ. центр по лесным ресурсам, 1996.
3. Чайка А. Н., Быков А. А. Анализ риска возникновения лесных пожаров в зависимости от метеорологических условий (на примере Московской области) //Междисциплинарные исследования проблем обеспечения безопасности жизнедеятельности населения в современных условиях: Материалы. – 2007. – Т. 18. – №. 5. – С. 368.
4. Дмитриев А. Н., Кречетова С. Ю., Кочеева Н. А. Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай: Монография. – 2011.
5. Листов, А.А. Лесные пожары от гроз в лесах Севера / А.А. Листов // Лесное хозяйство. —1967. — №5. — С. 38-40.
6. Швецов Е. Г., Сухинин А. И., Пономарев Е. И. Исследование влияния погодных условий на возникновение пожаров от гроз //Хвойные бореальной зоны. – 2008. – Т. 25. – №. 1-2.
7. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Детерминированно-вероятностный прогноз лесопожарных возгораний //Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15. – №. 5.
8. Барановский Н. В. Влияние антропогенной нагрузки и грозовой активности на вероятность возникновения лесных пожаров //Сибирский экологический журнал. – 2004. – №. 6. – С. 835-842.
9. Нестеров В.Г. Горимость лесов и методы ее определения. - Л.: Гослесбумиздат, 1949. - 74 с.
10. Нестеров В.Г. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса / В.Г. Нестеров, М.В. Гриценко, Т.А. Шабунина // Гидрология и метеорология. - 1968. - № 9. - С. 102 - 104.

- 11.Сверлова Л. И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. – 2000.
- 12.Софронов М. А., Софронова Т. М., Волокитина А. В. Оценка пожарной опасности по условиям погоды с использованием метеопрогнозов //Лесное хозяйство. – 2004. – №. 6. – С. 31-32.
- 13.Здерева М. Я., Виноградова М. В. Среднесрочный прогноз степени пожарной опасности в лесах по метеорологическим условиям //Метеорология и гидрология. – 2009. – №. 1. – С. 16.
- 14.Телицын Г.П. Логарифмический показатель пожарной опасности для леса// Лесное хозяйство. - 1970:(11);58-9.
- 15.Телицын Г. П. Лесные пожары, их предупреждение и тушение в Хабаровском крае //Хабаровск: ДальНИИЛХ. – 1988.
- 16.Белов П. Н., Борисенков Е. П., Панин Б. Д. Численные методы прогноза погоды: Учебное пособие. – Гидрометеиздат, 1989.
- 17.Репинская Р. П., Анискина О. Г. Конечно-разностные методы в гидродинамическом моделировании атмосферных процессов //СПб.: изд. РГГМУ. – 2002.
- 18.Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. – Гидрометеиздат, 1979.
- 19.Wang W. et al. User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.9 //Mesoscale and Microscale Meteorology Division– National Center for Atmospheric Research (MMM-NCAR). – 2007.
- 20.Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM //в кн. 80 лет Гидрометцентру России. – 2010. – С. 95.
- 21.Консервативные схемы [Электронныйресурс] / Методы решения дифференциальных уравнений.- Электрон.дан.-2018.- Режим доступа:metody-resheniya-differentsialnykh-uravnenij/konservativnyeskhemy.html, свободный

22. Setting up the map [Электронный ресурс] / Basemap Matplotlib Toolkit 1.1.0.- Электрон.дан.-2016.- Режим доступа: <https://matplotlib.org/basemap/users/mapsetup.html>, свободный
23. Dee D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system //Quarterly Journal of the royal meteorological society. – 2011. – Т. 137. – №. 656. – С. 553-597.
24. Ebert E. E. Methods for verifying satellite precipitation estimates //Measuring precipitation from space. – Springer, Dordrecht, 2007. – С. 345-356.
25. Дробжева Я. В., Волобуева О. В. Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность. – 2016.

Приложение №1

namelist.input

&time_control

```
run_days      = 1,  
run_hours    = 24,  
run_minutes  = 0,  
run_seconds  = 0,  
start_year   = 2010,  
start_month  = 09,  
start_day    = 09,  
start_hour   = 12,  
start_minute = 00,  
start_second = 00,  
end_year     = 2010,  
end_month    = 09,  
end_day      = 11,  
end_hour     = 12,  
end_minute   = 00,  
end_second   = 00,  
interval_seconds = 21600,  
input_from_file = .true.,  
history_interval = 180,  
frames_per_outfile = 1000,  
restart      = .false.,  
restart_interval = 5000,  
io_form_history = 2,  
io_form_restart = 2,  
io_form_input = 2,  
io_form_boundary = 2,  
debug_level = 0,  
/  

```

&domains

```
time_step      = 120,  
time_step_fract_num = 0,  
time_step_fract_den = 1,  
max_dom        = 1,  
e_we           = 121,  
e_sn           = 104,  
e_vert         = 35,  
p_top_requested = 5000,  
num_metgrid_levels = 27,  
num_metgrid_soil_levels = 4,
```

```
dx          = 15800,  
dy          = 15800,  
grid_id     = 1,  
parent_id   = 1,  
i_parent_start = 1,  
j_parent_start = 1,  
parent_grid_ratio = 1,  
parent_time_step_ratio = 1,  
feedback    = 1,  
smooth_option = 0,  
/  

```

```
&physics  
mp_physics  = 3,  
ra_lw_physics = 1,  
ra_sw_physics = 1,  
radt       = 30,  
sf_sfclay_physics = 1,  
sf_surface_physics = 1,  
bl_pbl_physics = 1,  
bldt       = 0,  
cu_physics = 1,  
cudt       = 5,  
isfflx     = 1,  
ifsnow     = 0,  
icloud     = 1,  
surface_input_source = 1,  
num_soil_layers = 4,  
sf_urban_physics = 0,  
maxiens    = 1,  
maxens     = 3,  
maxens2    = 3,  
maxens3    = 16,  
ensdim     = 144,  
/  

```

```
&fdda  
/  

```

```
&dynamics  
w_damping   = 0,  
diff_opt    = 1,  
km_opt      = 4,  
diff_6th_opt = 0,  

```

```

diff_6th_factor      = 0.12,
base_temp            = 290.,
damp_opt             = 0,
zdamp                = 5000.,
dampcoef             = 0.2,
khdif                = 0,
kvdif                = 0,
non_hydrostatic     = .true.,
moist_adv_opt        = 1,
scalar_adv_opt       = 1,
/

&bdy_control
spec_bdy_width       = 5,
spec_zone             = 1,
relax_zone            = 4,
specified             = .true.,
nested                = .false.,
/

&grib2
/

&namelist_quilt
nio_tasks_per_group  = 0,
nio_groups            = 1,
/
                start_year      = 2010,

namelist.wps

&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 1,
start_date = '2010-09-09_12:00:00',
end_date = '2010-09-10_12:00:00',
interval_seconds = 21600,
io_form_geogrid = 2,
opt_output_from_geogrid_path = '/data0/home/213/fire/',
debug_level = 0,
/

&geogrid
parent_id      = 1,

```

```
parent_grid_ratio = 1,  
i_parent_start   = 1,  
j_parent_start   = 1,  
e_we             = 121,  
e_sn             = 104,  
geog_data_res    = '5m',  
dx = 15800,  
dy = 15800,  
map_proj = 'polar',  
ref_lat  = 59.07,  
ref_lon  = 40.245,  
truelat1 = 59.07,  
truelat2 = 90,  
stand_lon = 40.245,  
geog_data_path = '/data0/home/151/geobase',  
opt_geogrid_tbl_path = '/data0/home/213/fire/',  
ref_x = 60.5,  
ref_y = 52.0,  
/  

```

&ungrib

```
out_format = 'WPS',  
prefix = 'FILE',  
/  

```

&metgrid

```
fg_name = 'FILE',  
io_form_metgrid = 2,  
opt_output_from_metgrid_path = '/data0/home/213/fire/',  
opt_metgrid_tbl_path = '/data0/home/213/fire/',  
/  

```

Приложение №2

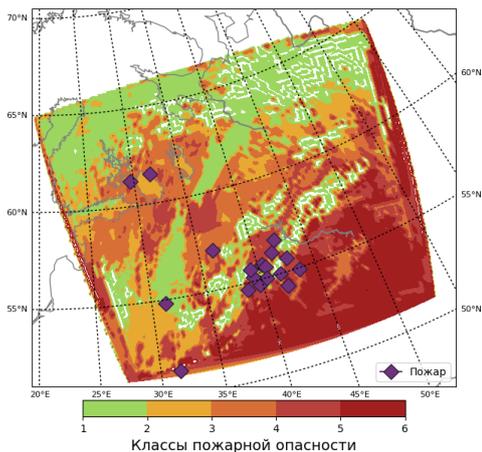


Рисунок 2.1 – Прогноз
пожароопасности по КППО
Нестерова на 11.08.2010

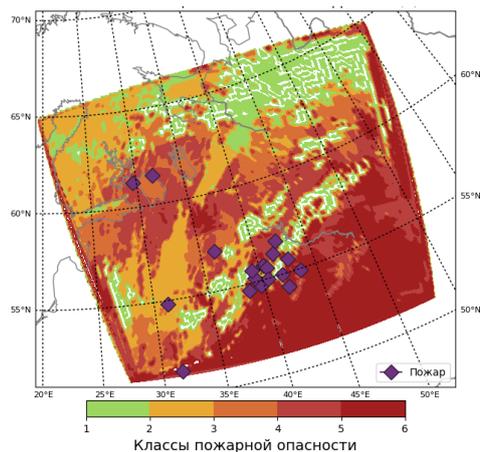


Рисунок 2.2 – Прогноз
пожароопасности по КППО
Софронова(1) на 11.08.2010

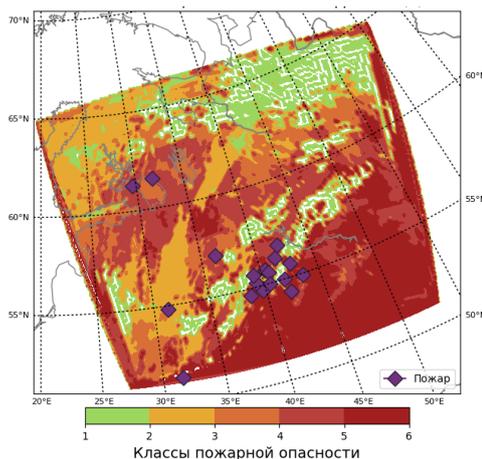


Рисунок 2.3 – Прогноз
пожароопасности по КППО
Софронова(2) на 11.08.2010

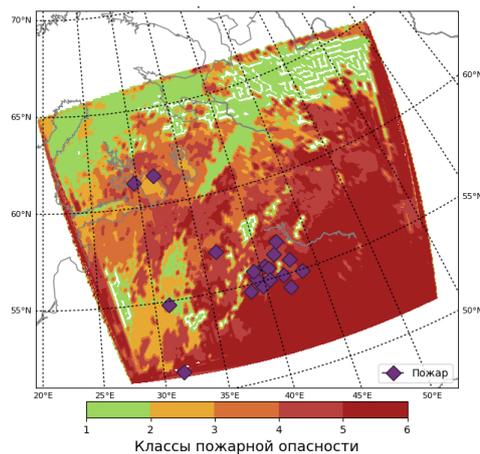


Рисунок 2.4 – Прогноз
пожароопасности по КППО
Сверловой на 11.08.2010

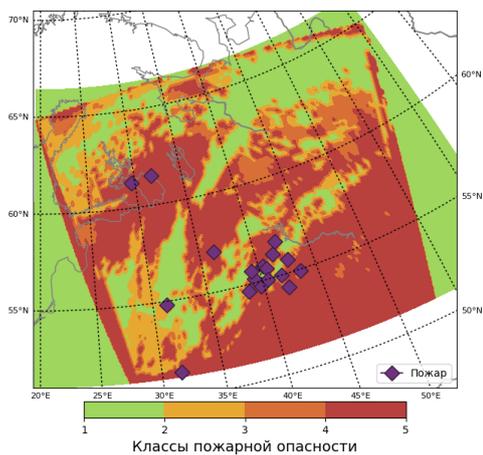


Рисунок 2.5 – Прогноз
пожароопасности по КПО
Телицына на 11.08.2010

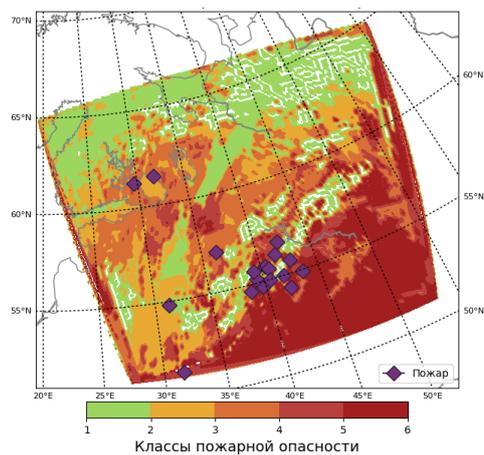


Рисунок 2.6 – Прогноз
пожароопасности по КПО
Здеревой на 11.08.2010

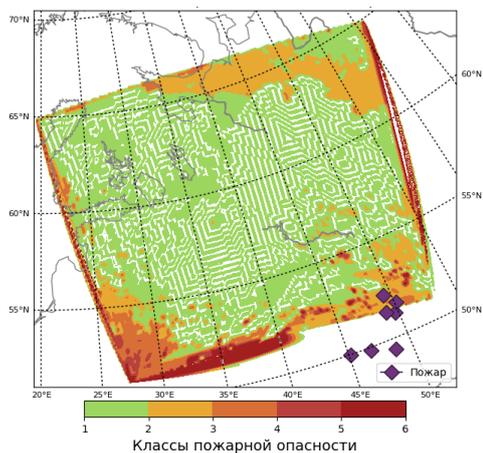


Рисунок 2.7 – Прогноз
пожароопасности по КПО
Нестерова на 25.08.2010

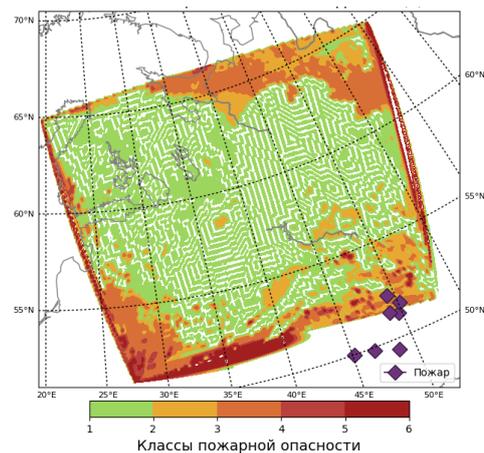


Рисунок 2.8 – Прогноз
пожароопасности по КПО
Софронова(1) на 25.08.2010

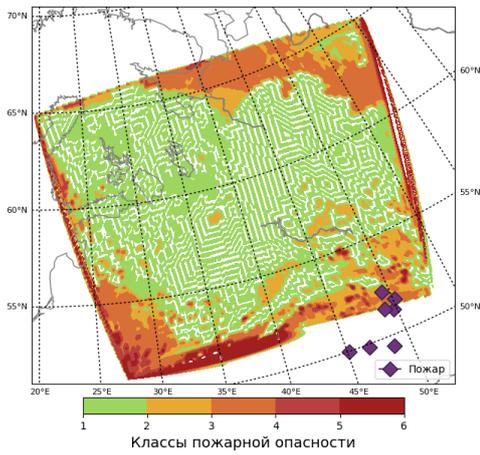


Рисунок 2.9 – Прогноз
пожароопасности по КПО
Софронова (2) на 25.08.2010

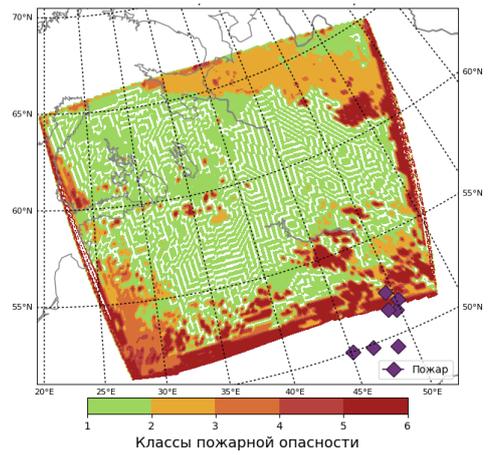


Рисунок 2.10 – Прогноз
пожароопасности по КПО
Сверловой на 25.08.2010

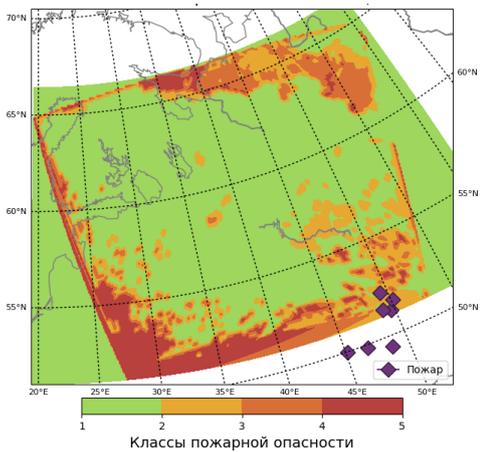


Рисунок 2.11 – Прогноз
пожароопасности по КПО
Телицына на 25.08.2010

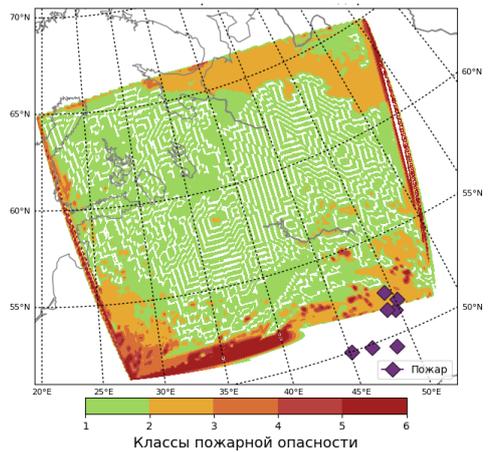


Рисунок 2.12 – Прогноз
пожароопасности по КПО
Здеровой на 25.08.2010