



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Исследование смерчопасных ситуаций с использованием
мезомасштабной модели WRF-ARW»

Исполнитель Эршов Мардон Чори угли
(фамилия, имя, отчество)

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

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«8» июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕДЕНИЕ	2
1 СМЕРЧ КАК ОПАСНОЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ	6
1.1 Общие сведения о смерчах и сопутствующих им метеорологических условиях.....	6
1.2 Основные характеристики смерчей.....	10
1.3 Синоптические условия образования смерчей	12
1.4 Классификация смерчей.....	16
1.5 Шкалы интенсивности смерчей.....	18
1.6 Пространственное распределение смерчей	21
2 ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ И ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ СИЛЬНЫХ ШКВАЛОВ	25
2.1 Смерч 20 июня 2022 года в районе города Бобруйска (Могилёвская область)	25
2.2 Смерч в Прикамье, 18 июля 2012 года.....	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	55
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	58

ВЕДЕНИЕ

Среди опасных явлений погоды смерчи занимают особое место, так как они имеют локальный характер. В большинстве случаев очень сложно фиксировать и, тем более, прогнозировать данное явление, так как оно внезапное и очень кратковременное.

Смерчи – это мощные вихревые столбы, которые обладают значительной разрушительной силой. Они представляют собой один из наиболее опасных природных катаклизмов, которые могут возникать в различных частях мира и могут нанести существенный ущерб людям и инфраструктуре. Смерчи обладают уникальной формой – вращающаяся колонна воздуха с вертикальной осью. Образование смерча возможно при специальных метеорологических условиях, обычно в местах, где проходит фронт воздушных масс, вблизи грозовых облаков или на грани атмосферной неустойчивости. Сильные вихревые движения создают условия для развития турбулентных потоков, которые могут возрастать в силе и приводить к образованию опасных смерчевых столбов.

Изучение принципов и механизмов образования смерчей является важной задачей для ученых и метеорологов, чтобы прогнозировать возможное появление и дать рекомендации по предотвращению разрушительных последствий. В данной работе будет рассматриваться более подробно теория образования смерчей, их опасности и меры предосторожности, которые необходимо предпринимать для предотвращения разрушительных последствий. Мезомасштабная модель WRF-ARW (Weather Research and Forecasting Model – Advanced Research WRF) используется для исследования атмосферных процессов и прогнозирования погоды с высоким разрешением в мезомасштабных масштабах. Эта модель может быть использована для

исследования смерчопасных ситуаций и прогнозирования потенциального возникновения смерчей.

Модель WRF-ARW основывается на уравнениях гидродинамики атмосферы, решаемых численными методами. WRF-ARW позволяет моделировать различные характеристики атмосферы, такие как температура, влажность, скорость ветра и другие. При исследовании смерчопасных ситуаций, модель может отображать динамику воздушных масс и изменения ветрового поля в реальном времени. Использование мезомасштабной модели WRF-ARW для исследования смерчей может помочь в прогнозировании возможности их возникновения в определенных регионах. Результаты моделирования WRF-ARW могут быть использованы для создания карт, которые показывают вероятность возникновения смерчей в различных регионах и прогнозирования их перемещения. Это помогает принимать меры предосторожности и обеспечить защиту для населения и объектов инфраструктуры в зоне возможного риска. Таким образом, использование мезомасштабной модели WRF-ARW для исследования смерчопасных ситуаций является важным инструментом для ученых и метеорологов в работе по защите населения и предотвращения разрушительных последствий.

Актуальность работы состоит в том, что в настоящее время информационные технологий быстро прогрессируют и рост вычислительных мощностей позволяют решать задачи, которые требовательны к большому числу ресурсов и поэтому ранее не были выполнимыми. На сегодняшний день одной из таких задач является моделирование состояния атмосферы и прогноз погоды. Постоянное совершенствование прогностических моделей, которые разрабатываются во многих странах существенно облегчают решение этой задачи. Разнохарактерность моделей позволяет моделировать атмосферные процессы не только по всему земному шару, но и предназначены для прогноза погоды на территории какого-либо региона.

В данной работе особый интерес уделяется прогнозу развития атмосферной конвекции и связанных с ней опасного метеорологического явления, такого как смерч, при помощи современной модели атмосферы WRF-ARW.

Для решения данной проблемы в мире используется два основных подхода:

- 1) использование физико-статистических параметров неустойчивости атмосферы, определяемых по данным глобальных моделей атмосферы;
- 2) моделирование конвекции по данным мезомасштабных моделей атмосферы с высоким пространственным разрешением.

В настоящее время прогностические модели постоянно совершенствуются: растет их пространственное разрешение, повышается качество воспроизведения атмосферных процессов. Таким образом, в ближайшие годы тема моделирования атмосферной конвекции и связанных с ее развитием опасных метеорологических явлений будет оставаться актуальной [3].

Целью данной работы является выявление условий формирования опасных метеорологических явлений конвективного происхождения на исследуемом регионе для повышения качества их диагноза и прогноза с помощью мезомасштабной прогностической модели WRF.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Создать архив данных, содержащий сведения об смерчах по результатам стандартных метеорологических наблюдений, а также свидетельствам очевидцев и других косвенных признаков.
2. Определить возможности применения гидродинамического моделирования для прогнозирования опасных метеорологических явлений конвективного происхождения – смерчей.

3. Осуществить подбор оптимальной конфигурации мезомасштабной прогностической модели WRF, обеспечивающей получение наиболее качественного прогноза мезомасштабных конвективных систем, и связанных с ними опасных метеорологических явлений.

4. Оценить качество диагноза и прогноза мезомасштабных конвективных систем, генерирующих сильные смерчи.

Магистерская диссертация состоит из введения, 2 глав и заключения.

В первой главе описываются Общие сведения о смерчах и сопутствующих им метеорологических условиях.

Во второй главе исследуются случаи возникновения смерчей:

1. Смерч 20 июня 2022 года в районе города Бобруйска (Могилёвская область).
2. Смерчи в Прикамье 18 июля 2012 года.

Список использованных источников содержит 20 наименований.

1 СМЕРЧ КАК ОПАСНОЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ

1.1 Общие сведения о смерчах и сопутствующих им метеорологических условиях

Среди опасных метеорологических явлений смерч является одним из самых сложных и трудно прогнозируемых. В мировой научной литературе используются различные синонимы этого явления.

Смерч – сильный маломасштабный вихрь под облаками с приблизительно вертикальной, но часто изогнутой осью. Видимыми проявлениями смерча являются:

- материнское облако, откуда смерч берет свое начало;
- стремительное круговое движение воздуха – вихрь;
- подстилающая поверхность земли или воды, которой в большинстве случаев касается смерч.

В качестве материнского облака для смерча обычно выступает:

- кучево-дождевое облако (Cb) (рисунок 1.1а,г), которое может сопровождаться грозовой активностью;
- мощное кучевое облако (Cu con) (рисунок 1.1б) ;
- облако хорошей погоды (Cu hum) (рисунок 1.1в).

В большинстве случаев смерчи возникают с правой стороны облака, представляя собой продолжение крутящегося вала. Интенсивность смерча определяется типом материнского облака в совокупности с атмосферными условиями, при которых он формируется.



а



б



в



г

Рисунок 1.1 – Примеры облаков, которые связаны со смерчем. Кучево-дождевое облако: смерч в Одесской области, 12.07.2018(а); мощное кучевое облако: Смерч в Мытищах, 15 июля 2021 (б); облако хорошей погоды: смерч над Обнинском, 24 мая 2013 (в); смерч над Финский заливом, 6 августа 2022 г. (г)

Следующее определение смерча основывается на акценте на других характеристиках.

Смерчи – это сильные вращающиеся столбы воздуха, которые образуются в случае, когда низкий устойчивый слой воздуха богат влагой и нагрет солнечным излучением. Они обычно формируются в условиях грозовой облачности или в местах с высокими скоростями ветра и большой термической неустойчивостью.

Когда движущийся воздушный фронт поднимается над более холодным воздухом, образуется мощный вихрь, который приводит к образованию вихревой трубы. Воздух начинает вращаться, и формируется типичный смерчевой столб, по косвенным оценкам максимальные скорости в вихре составляют 200-300м/с, поэтому смерч считается самым разрушительным явлением природы [1]. Важным фактором, влияющим на формирование смерчей, является наличие вертикального сдвига ветра и достаточной влажности. Эти условия обычно возникают в результате сильных грозowych облаков, когда большой объем воздуха быстро поднимается, вызывая турбулентные потоки и образование вихревых труб. Благоприятными условиями для образования смерча считается не только большая неустойчивость атмосферы, потому что при данных условия они образуются редко, а возможно мезомасштабные особенности циркуляции – характер эволюции и движения облаков и облачных систем [1].

Под интенсивностью смерча понимают характеристики кругового движения воздуха внутри него и степень оставленных после него разрушений. Так в большинстве случаев из кучево-дождевых облаков развиваются самые сильные по своей интенсивности смерчи. Слабые и непродолжительные смерчи обычно связаны с мощными или плоскими кучевыми облаками. Круговое движение воздуха в смерче происходит по спирали, направление вращения обычно циклоническое – против часовой стрелки в северном полушарии и по

часовой в южном. Однако имеют место случаи (заведомо менее 10% от общего числа) и антициклонического вращения: в северном полушарии – по часовой стрелке, в южном – против. Часто вихрь принимает форму воронки с расширяющейся частью, обращенной к материнскому облаку (рисунок 1.1б, рисунок 1.2). В природе существуют смерчи в виде столбов, рогов, конусов, песочных часов и др. В большинстве случаев в круговое движение воздуха вовлекаются частицы пыли или капли воды с подстилающей поверхности, а также капли воды из материнского облака, вследствие чего вихрь становится видимым и ярко очерченным.

Структура смерча весьма сложная. В центральной части смерча образуется так называемое ядро с достаточно сильными (60-80 м/с) нисходящими потоками воздуха. Вокруг ядра отмечаются восходящие движения, скорость которых составляет 70-90 м/с. Давление в центре смерча значительно ниже, чем на периферии. Быстрое падение давления в совокупности с большими скоростями ветра, достигающими иногда до 140 м/с, определяют разрушительные свойства смерчей. Интенсивным течением, возникающим вблизи поверхности соприкосновения смерча с сушей или водой, находящиеся поблизости предметы втягиваются внутрь него. Касание смерча подстилающей поверхности, как правило, свидетельствует об окончании основной фазы его формирования. В случае если касания не происходит, то говорят о возникновении облака-воронки (рисунок 1.3). Обычно интенсивность смерчей не связывают с типом поверхности, над которой они формируются, однако статистические данные говорят о том, что водяные смерчи чаще всего имеют малую интенсивность, небольшую по ширине воронку и непродолжительны по времени своего существования [6].



Рисунок 1.2 – Облако-воронка (п. Большой Утриш 10 мая 2015 г.)

1.2 Основные характеристики смерчей

Основными характеристиками смерчей являются:

- скорость ветра,
- диаметр и высота вихря,
- длина пути,
- скорость перемещения,
- время жизни смерча.

Эти характеристики в природе очень сильно меняются.

Скорость ветра в смерчах может меняться в диапазоне 20-140 м/с.

Диаметр смерча обычно около 200 м, однако он может колебаться в широком диапазоне от 10 м до 1.5-2 км.

Высота вихря достигает нескольких сот метров, иногда до 1.5 км.

Что касается длины пути и скорости перемещения смерча, то в среднем они составляют 20-30 км и 50-60 км/ч, соответственно. Слабые смерчи, которые возникают над водной поверхностью, обычно практически не перемещаются или движутся с небольшой скоростью.

Время жизни смерча зависит от многих факторов, в частности, от интенсивности поддерживающих его восходящих потоков, а также от особенностей подстилающей поверхности на пути его перемещения. Чаще всего оно колеблется от нескольких минут до нескольких часов, для слабых смерчей, как правило, не превышает 10 минут. Самый продолжительный смерч в истории был зафиксирован в США в 1917 г. Он просуществовал 7 часов 20 минут.

Что касается качественных характеристик смерчей, то по свидетельствам очевидцев в некоторых случаях им сопутствуют акустические волны, ощущаемые как шипение, свист или грохот. Громкость звука в непосредственной близости к смерчу велика, но быстро убывает с расстоянием. Помимо звуков очевидцы также иногда наблюдают в смерчах световые шары, облака, кольца и др. Этот факт можно объяснить тем, что вихри в смерчах также генерируют и электромагнитные поля, сопровождаемые молниями различной формы.

Перечисленные особенности смерчей до сих пор не вполне изучены. Тем не менее, в США уже сейчас разрабатывается прототип системы инфразвуковой сети IS Net, разработанные компанией Environmental Technology. Лабораторные и работающие на более высоких частотах (около 1 Гц) системы, которые позволяют по-новому взглянуть на акустику в суровых погодных условиях. Инфразвуковые обсерватории могут помочь в достижении целей по сокращению сроков предупреждения о торнадо. Данная система наблюдает за низкочастотными звуками во время торнадо, указывающими на ряд сценариев обнаружения и потенциальное время предупреждения, и их обнаружение может

послужить основой для улучшения и повышения качества прогноза опасных явлений погоды и в первую очередь смерчей [6,7].

1.3 Синоптические условия образования смерчей

Смерчи чаще опускаются из облаков, нижняя граница которых находится на высоте нескольких сотен метров над поверхностью земли.

Смерч - явление локальное. Однако возникновение смерча в первую очередь определяется макромасштабными атмосферными процессами. Кроме того, необходимо, чтобы в атмосфере имелся еще ряд благоприятных условий для их возникновения.

1. Смерчи возникают вблизи атмосферных фронтов. Неподалеку от центра циклона или волнового возмущения:

- в 70% случаев смерчи возникают в теплом секторе циклона в 50 – 100 км впереди холодного фронта;
- в 20% случаев вблизи точки окклюзии;
- в 5% случаев впереди линии теплого фронта, но не далее 100 км от него;
- в 5% случаев в однородной воздушной массе.

2. В воздушной массе, в которой возможно развитие смерча, часто на высоте 2000 – 2500 метров имеется слой сухого воздуха с дефицитом точки росы более 10°C, ниже которого существует задерживающий слой. Наличие слоя сухого воздуха при прочих благоприятных условиях способствует образованию смерчей. Когда нисходящий поток в кучево-дождевом облаке достигает сухого слоя, температура воздуха в нем вследствие испарения начинает быстро понижаться. Тогда на небольшом расстоянии возникают

большие температурные контрасты и большие градиенты давления, в этой области низкого давления вероятно возникновение смерчей.

3. Сильные смерчи возникают в сверхмощных кучево-дождевых облаках высотой 12—14 км, вершины которых превышают тропопаузу на 1—3 км. Необходимым условием образования таких облаков является быстрый подъем теплого и влажного воздуха вдоль фронтальной поверхности и в результате окклюдирования. Процесс окклюдирования и неравномерная из-за больших скоростей ветра адвекция температуры создают в течение короткого во времени сверхсухоадиабатические вертикальные градиенты температуры в нижних слоях тропосферы, приводят к разрушению задерживающего слоя и возникновению очень мощных кучево-дождевых облаков.

Более слабые могут возникать и в несколько других синоптических ситуациях, вдали от центров циклонов, волновых участков холодных фронтов или вблизи фронтов окклюзии. Однако и в этом случае фронты перемещаются с большими скоростями, что способствует образованию высоких облаков. Совсем слабые смерчи, диаметром до 10 — 20 м, встречаются в однородной воздушной массе — под заполняющимися обширными высотными циклонами. В таких ситуациях основная роль в образовании мощных облаков принадлежит термической конвекции.

Особое место занимают смерчи, наблюдающиеся у Черноморского побережья Кавказа. Эти смерчи возникают в результате мощных вторжений холода на Кавказ при температуре морской воды более 20°C. При этом синоптическая ситуация у земли характеризуется погодой, присущей тыловым частям циклонов, в средней тропосфере наблюдается устойчивый западно-восточный перенос воздушных масс со скоростью около 20 м/с.

Атмосферные процессы, при которых возможно образование смерчей различной интенсивности, в целом характеризуются перемещением с юга и юго-запада на север и северо-восток циклонов и активных волновых

возмущений, и их можно разделить на четыре типа (см. рисунок 1.3). Для всех четырех типов атмосферных процессов отличительными особенностями являются:

- быстрое окклюдирование полярной фронтальной системы;
- наличие в теплом секторе циклонов влажного воздуха морского происхождения

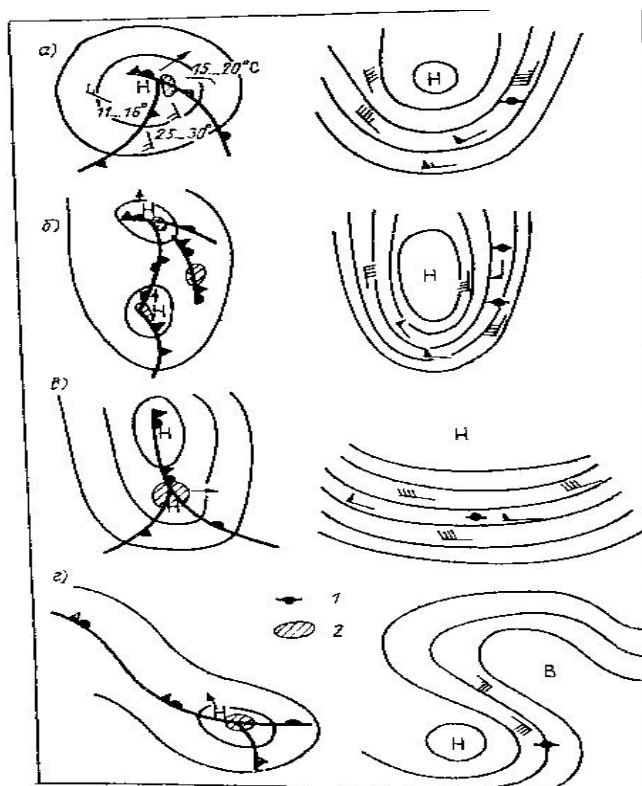


Рисунок 1.3 – Схема процессов, при которых возможно образование смерчей.

Слева - приземная карта погоды, справа - карта АТ500 1 - местоположение циклона у земли 2 - район наиболее вероятного образования смерчей

1 тип (рис. 1.3а) Характеризуется быстрым, со скоростью 40 — 60 км/ч. перемещением южного углубляющегося (падение давления более 3 - 4 гПа/3 ч) циклона на северо-восток (север или северо-запад) вдоль передней части высотной барической ложбины на поверхности 500 гПа. В то же время в

верхней тропосфере существует струйное течение, направленное с юго-запада на северо-восток, со скоростями ветра на оси 40 - 50 м/с, а в пограничном слое атмосферы — струйное течение нижних уровней, направленное с с юго-востока или с юга на северо-запад или север, со скоростями на оси 12- 18 м/с и более. При первом типе атмосферных процессов вероятно возникновение вблизи центра циклона (и впереди теплого фронта, у точки окклюзии и впереди холодного фронта) наиболее сильных смерчей интенсивностью 2 — 4 балла. Такая ситуация часто обуславливает смерчи в Центральном, Центрально-Черноземском, Волго-Вятском, Северном районах и на Урале.

2 тип (рис 1.3б) Отличается хорошо выраженной меридиональностью процессов. Вследствие этого южные циклоны и активные волновые возмущения перемещаются на север со скоростью 50-80 км/ч. Часто в теплом секторе этих циклонов имеется фронт окклюзии тропической фронтальной системы. Образование смерчей интенсивностью 1—2 балла вероятно вблизи центра волновых возмущений и на фронте окклюзии. Такой тип процессов приводит к смерчам, чаще наблюдающимся в Прибалтике и Белоруссии.

3 тип (рис. 1.3в) Характеризуется большой скоростью перемещения воздушных масс в зональном направлении. По этой причине происходит быстрое окклюдирование полярной фронтальной системы. У точки окклюзии образуется небольшой по площади, но активный циклон, быстро движущийся на восток. Вблизи центра циклона вероятно образование смерчей интенсивностью 0—2 балла. Этот тип процессов вызывает смерчи чаще в Молдавии, на юге Украины на Северном Кавказе.

4 тип (рис. 1.3г) Отличается тем, что на периферии обширной барической ложбины у поверхности земли у точки окклюзии большой протяженности фронта окклюзии образуется циклон. Этот циклон движется на северо-запад (северо-восток или юго-восток) в зависимости от направления ведущего потока. Вблизи центра циклона возможны смерчи интенсивностью

0—1 балл. Такие ситуации чаще приводят к возникновению смерчей на Украине, Северном Кавказе, востоке Центрально-Черноземного района и на западе Поволжья.

Таким образом, возникновение смерчей наблюдается тогда, когда происходит взаимодействие атмосферных процессов различных масштабов. При этом: — макромасштабные процессы (эволюция циклопов и атмосферных фронтов) создают на больших пространствах благоприятные условия для возникновения конвективной неустойчивости;

— мезомасштабные процессы (неравномерная адвекция по высотам, наличие задерживающего и сухого слоев) обуславливают возникновение облачных массивов и среди них отдельных сверхмощных кучево-дождевых облаков;

— микромасштабные процессы (понижение вследствие испарения температуры воздуха в нисходящем потоке кучево-дождевого облака) приводят к возникновению в сверхмощных облаках смерчей.

1.4 Классификация смерчей

В зависимости от механизма формирования смерчей их принято подразделять на

- мезоциклонные (рисунок 1.4а);
- немезоциклонные (рисунок 1.4б).

Первые формируются из мощной конвективной ячейки, называемой суперячейкой, в структуре которой присутствует мезоциклон. Мезоциклон — это воздушный вихрь, отличающийся от более известного смерча большими масштабами, меньшей скоростью вращения, а также большей (несколько десятков минут) продолжительностью жизни. Возникает он на одной из стадий развития мощного грозового облака, называемого суперячейкой [8].

Инициатором вторых является предварительно сформированное круговое движение воздуха вблизи подстилающей поверхности, которое восходящими потоками вытягивается вверх к материнскому облаку.



Рисунок 1.4 – Классификация смерчей: мезоциклонный (а) и немезоциклонный (б)

1.5 Шкалы интенсивности смерчей

Наиболее распространенной шкалой для классификации смерчей является введенная в 1971 г. в США шкала Фудзиты (Fujitascale) (таблица 1.1) [6]. В 2007 г. ей на смену пришла улучшенная шкала Фудзиты (Enhanced Fujita Scale). Несмотря на некоторую устарелость первой из них, в научной литературе до сих пор встречается классификация смерчей в соответствии с этой шкалой.

Таблица 1.1 – Классификация смерчей по исходной и улучшенной шкале Фудзиты [6]

Шкала Фудзиты		Улучшенная шкала Фудзиты		Степень разрушений	Категория смерчей
Класс	Оценочная скорость ветра, м/с	Класс	Оценочная скорость ветра, м/с		
F0	<32	EF0	29-38	небольшая	слабые
F1	32-50	EF1	39-49	средняя	
F2	51-70	EF2	50-60	значительная	сильные
F3	71-92	EF3	61-73	сильная	
F4	93-116	EF4	74-90	громадная	крайне сильные
F5	117-142	EF5	> 90	колоссальная	

В исходной и улучшенной шкале Фудзиты выделяют шесть классов смерчей. Определяющими признаками того или иного класса являются оценочная скорость ветра, а также степень разрушений, оставленных после прохождения смерча. В отличие от исходной, в улучшенной шкале Фудзиты для более точной оценки ущерба были введены 28 индикаторов разрушений (объектов, подвергшихся разрушению).

Таблица 1.2 – Индикаторы уровня опасности смерчей

Уровень опасности	Индикатор урона	обозначение
1	Небольшие амбары, хозяйственные постройки	SBO
2	Жилые дома на одну или две семьи	FR12
3	Передвижной дом на колесах шириной в один дюйм (MHSW)	MHSW
4	Передвижной дом двойной ширины	MHDW
5	Квартира, кондоминиум, таунхаус (не более 3 этажей)	ACT
6	Мотель	M
7	Кирпичная кладка квартиры или мотеля	MAM
8	Корп. мелкой розничной торговли. (фаст-фуд)	SRB
9	Мелкий специалист (кабинет врача, отделение банка)	SPB
10	Торговый центр	SM
11	Крупный торговый центр	LSM
12	Большой, изолированный ("большая коробка") розничный корпус	LIRB
13	Автомобильный салон	ASR
14	Здание автомобильной службы	ASB
15	Школа - 1-этажная начальная школа	ES
16	Школа - младший или старший. средняя школа	JHSH
17	Малозэтажное (1-4 этажа) здание.	LRB
18	Здание средней этажности (5-20 этажей), корп.	MRB
19	Высотное здание (более 20 этажей)	HRB
20	Институциональный корпус (больница университет)	IB
21	Металлическая строительная система	MBS
22	Навес станции технического обслуживания	SSC
23	Склад (наклонные стены или тяжелая древесина)	WHB
24	Башня линии электропередачи	TLT
25	Отдельно стоящая башня	FST
26	Отдельно стоящий столб (фонарь, флаг, светило)	FSP
27	Дерево - твердая древесина	TH
28	Дерево - хвойные породы	TS

В шкале Фудзито степень разрушения определяется типом постройки. Для каждого типа определены конкретные характеристики. Например, тип «Мотель» характеризует постройки с плоской, двускатной, вальмовой или мансардной крышей, постройки со сборными стропильными фермами и т.п.

Для каждого из индикаторов было установлено несколько градаций их разрушения.

Другая известная шкала – шкала TORRO, получившая свое название по названию организации, занимавшейся ее разработкой (Tornado and Storm Research Organization, Великобритания) (таблица 1.2) [6]. В этой шкале выделяют одиннадцать классов смерчей. В качестве определяющих признаков класса также используется оценочная скорость ветра и общая характеристика разрушительных способностей смерча.

Таблица 1.2 – Классификация смерчей по шкале TORRO [6]

Класс	Оценочная скорость ветра, м/с	Характеристика смерча	Категория смерчей
T0	17-24	крайне слабый	слабые
T1	25-32	слабый	
T2	33-41	умеренный	
T3	42-51	сильный	
T4	52-61	крайне сильный	сильные
T5	62-72	интенсивный	
T6	73-83	умеренно-разрушительный	
T7	84-95	сильно-разрушительный	
T8	96-107	крайне-сильно разрушительный	крайне сильные
T9	108-120	интенсивно-разрушительный	
T10	121-134	супер-смерч	

Иногда в научной литературе используется более упрощенная шкала, включающая в себя три категории: слабые смерчи, сильные смерчи, крайне

сильные смерчи. В таблицах 1.1 и 1.2 каждого класса смерчей сопоставлена соответствующая ему категория.

1.6 Пространственное распределение смерчей

Пространственное распределение смерчей на земном шаре крайне неоднородно. Причиной этого является разнообразие климата, обуславливающее наличие территорий, где смерчи являются большой редкостью, ввиду отсутствия благоприятных условий для их формирования, а где вовсе наоборот.

Субъективность их учета, зависит во многом от плотности населения и наблюдательной сети. Как следствие, имеющиеся оценки частоты их появления в тех или иных странах могут быть занижены.

Наиболее благоприятны для образования смерчей обширные равнины, над которыми происходит встреча холодных и теплых воздушных течений. Примером таких равнин является территория центральных штатов Северной Америки, простирающаяся от Скалистых гор до гор Аппалачи. Эта область получила название «Аллея торнадо», где ежегодно регистрируются порядка 1000 смерчей.

В Европе Русская равнина по своей геоморфологии наиболее близка к равнинам Северной Америки, и, как следствие, в ее пределах также отмечаются случаи возникновения смерчей. Достаточно долгое время считалось, что среднее число смерчей, возникающих в странах бывшего СССР в год составляет 8-10. Однако, благодаря не так давно начатой работе российских специалистов по сбору данных о смерчах от различных источников и, в том числе, за счет уточнения случаев возникновения смерчей в лесной зоне России посредством обнаружения их на спутниковых снимках по оставленным после них

ветровалам, удалось получить новые оценки, в соответствии с которыми в России за год возникает около 100 смерчей. Наибольшая повторяемость смерчей отмечается у Черноморского побережья, а также в ряде регионов Средней полосы и Балтии.

В северо-восточных регионах Северной Евразии смерчи, как правило, не формируются. Самый северный смерч был выявлен на широте 68.8°с.ш. На рисунке 1.5 представлена карта пространственного распределения смерчей по земному шару. Как видно из рисунка помимо США и Европы наиболее подвержена возникновению смерчей территория Австралии. Меньший охват по смерчеопасности характерен для территории Бразилии, ЮАР, Новой Зеландии, Индии, Китая, Японии и Филиппин. Формирование смерчей в Южном полушарии, как правило, связано с глубокими меридиональными вторжениями воздушных масс, приводящими к тесному контакту резко контрастирующих между собой по свойствам полярного и тропического воздуха на образующемся холодном фронте.

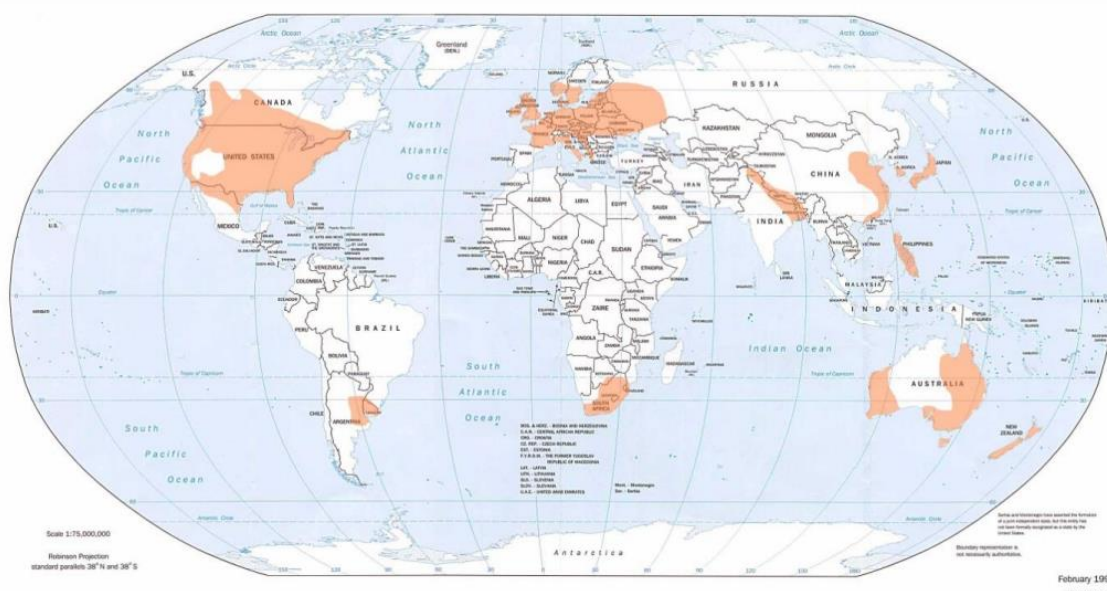


Рисунок 1.5 – Пространственное распределение смерчей на земном шаре [9]

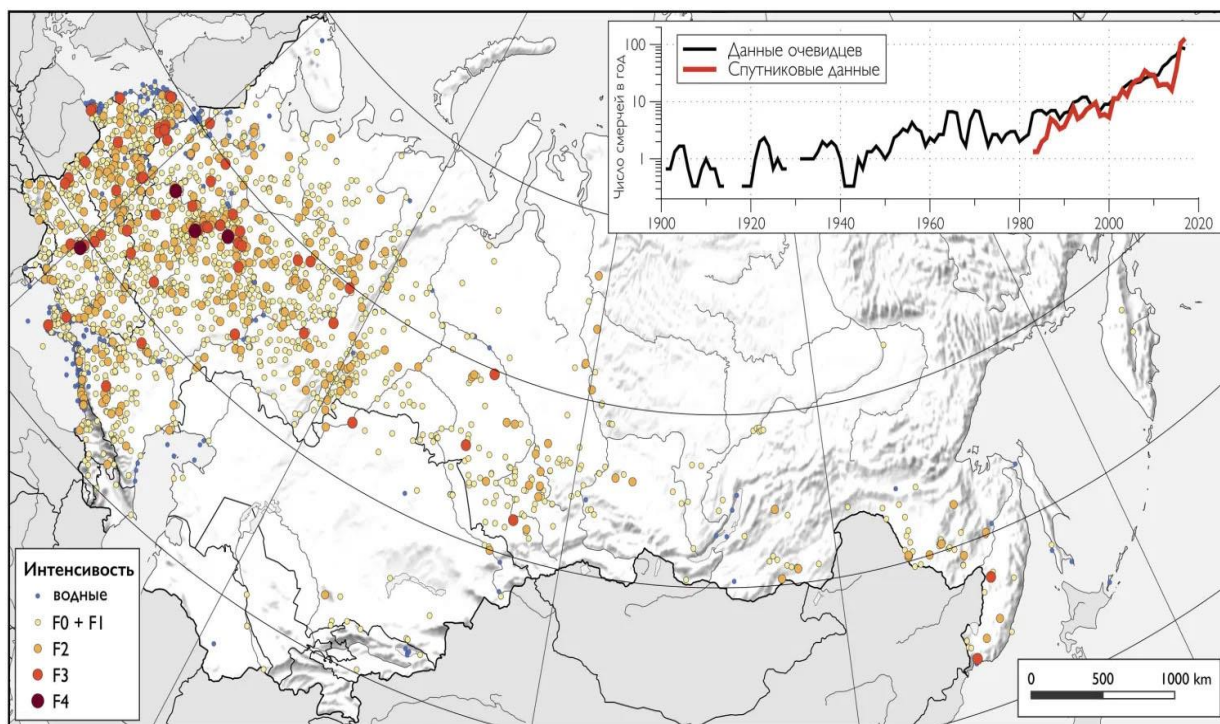


Рисунок 1.6 – Карта смерчей разной интенсивности в России и соседних странах с X века по 2016 год. *На врезке:* изменение числа смерчей (трехлетнее скользящее) в России с 1900 по 2018 годы, по данным очевидцев и спутниковых наблюдений [13]

В настоящее время отмечается повышение интереса научной общественности к смерчам, которое проявляется в увеличении свидетельств очевидцев и их публикаций в глобальной сети Интернет и в СМИ, что позволяет вести статистику даже самых слабых по своей интенсивности смерчей, которые в официальных метеосводках могут и не упоминаться. Подобная тенденция отчасти объясняет ежегодное увеличение количества наблюдаемых на земном шаре смерчей. Однако не следует исключать возможности влияния и процессов изменения климата нашей планеты, которые, по-видимому, способствуют возникновению благоприятных для зарождения смерчей условий там, где ранее эти явления никогда не регистрировались.

Связь торнадо с глобальным потеплением не столь очевидна, как в случае волн экстремальной жары и других аномальных погодных условий. Среднегодовое количество штормов, порождающих торнадо, на востоке США увеличится на 6,6% к 2100 году. Это частично объясняется долгосрочным повышением средней температуры. Бури образуются, когда теплый и влажный воздух вблизи земли сталкивается с сухим холодным воздухом в верхних слоях атмосферы. Тёплые массы устремляются вверх, а холодные – вниз, влага конденсируется, образуя осадки. В течение десяти лет глобальная температура повысится на 1,5°C по сравнению с доиндустриальным уровнем. Следовательно, у поверхности земли будет накапливаться больше тёплого воздуха, что создаёт условия для большей атмосферной неустойчивости и формирования штормов и торнадо [5].

2 ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ И ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ СИЛЬНЫХ ШКВАЛОВ

2.1 Смерч 20 июня 2022 года в районе города Бобруйска (Могилёвская область)

В данной работе был исследован случай смерчеобразующей конвективной ячейки, наблюдавшейся 20 июня 2022 года в районе города Бобруйска (Могилёвская область). Данная ячейка привела к образованию смерча в 22:10 ВСВ в районе агрогородка Боровица, расположенного в 30 км на северо-восток от города Бобруйск [16].

Для исследования этого смерча была создана версия модели WRF-ARW со следующими характеристиками.

Конфигурация модели WRF-ARW для моделирования смерча около Боровицы.

Область моделирования представлена на рисунке 2.1.

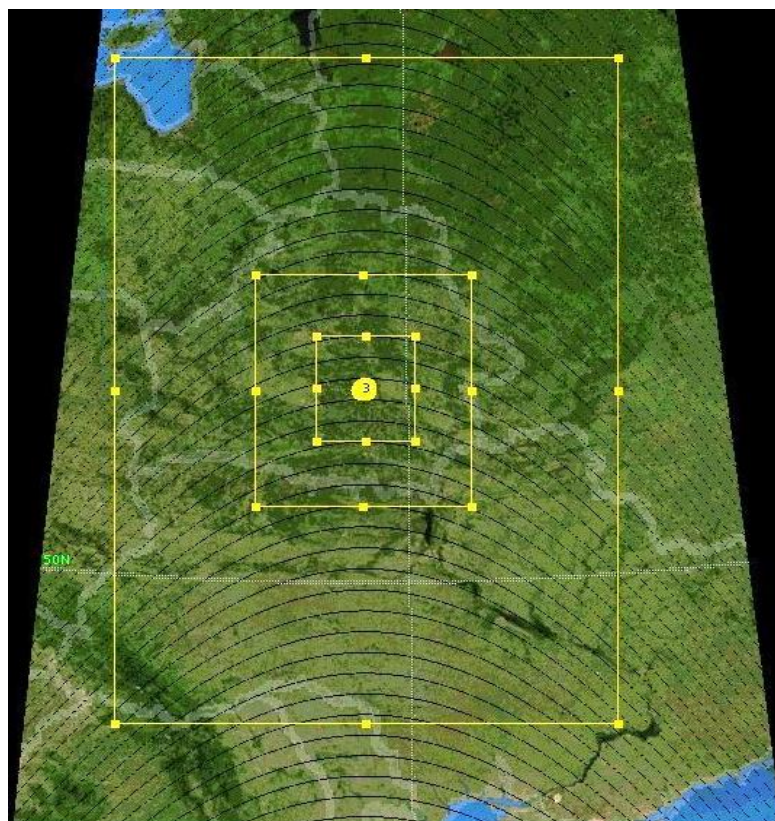


Рисунок 2.1 – Область моделирования

Область моделирования состоит из трёх (одна материнская и две вложенных) сеток.

- Первая сетка, материнская, имеет шаг по горизонтальным координатам 9000 м, содержит 90 узлов по оси абсцисс и 130 по оси ординат. Шаг по времени 30 секунд.
- Вторая сетка (вложенная номер 1): шаг по горизонтали 3000 м, количество узлов 115x136. Шаг по времени 10 секунд.
- Третья сетка (вложенная номер 2, самая мелкая): шаг по горизонтали 1000 м, количество узлов 157-184. Шаг по времени 3,3 секунды

Во всех сетках 35 уровней по вертикали до изобарической поверхности 50 гПа.

Начальные и граничные условия для материнской сетки получены по результатам анализа модели GFS с разрешением 0.25° . Начальные и граничные условия для вложенных сеток получены из результатов моделирования на материнской сетке.

Заблаговременность прогноза 36 часов от 00:00 UTC 20 июня 2020 г. до 12 UTC 21 июня 2020 г. Случай смерча попадает в середину прогностического срока и можно проследить эволюцию метеорологических полей.

Используемые параметризации физических процессов описаны в таблице 2.1, они одинаковы для всех сеток.

Таблица 2.1 Номер опции и названия схем параметризации

Номер опции в управляющем файле namelist.input и далее в тексте ВКР	Название схемы
0	Без параметризации конвекции
1	Схема Кейна–Фритша [10]
2	Схема Беттса-Миллера-Янича [11]
3	Ансамблевая схема Грелла–Фрейтаса [12]
5	Ансамблевая 3D схема Грелла [14]
6	Схема Тидтке [15]

Схема параметризации конвекции Беттса-Миллера-Янича основана на решении упрощенного уравнения притока тепла, где предполагается что существует баланс между вертикальной адвекцией и конвективным притоком тепла. Профили глубокой конвекции и время релаксации (подстройки профилей температуры и влажности после реализации конвективной деятельности) являются переменными и зависят от эффективности облака – безразмерного параметра, характеризующего конвективный режим. Эффективность облака зависит от изменения энтропии, количества осадков и средней температуры

облака. Если рассматривается мелкая конвекция, то учитывающий конвекции, профиль влажности выводится из требования, чтобы изменение энтропии было небольшим и неотрицательным [17].

Схема параметризации конвекции Каина-Фритша (КФ) основана на рассмотрении единичного конвективного облака, в одномерной модели облака. В данной схеме предполагается, что смесь воздуха, которая приобретает отрицательную плавучесть, вытекает из облака, а смесь воздуха, которая приобретает положительную плавучесть, в облако вовлекается. Конвективное перемешивание оценивается по слоям и обеспечивает двухсторонний обмен между окружающей средой и облаком. Расчёт термодинамических характеристик в области восходящих движений происходит в предположении сохранения в поднимающемся объёме воздуха эквивалентно-потенциальной температуры и общего количества водной субстанции (суммы водяного пара и гидрометеоров).

Схема КФ основана на удалении в процессе параметризации 90% первоначальной доступной потенциальной энергии (CAPE). Период релаксации (конвективного приспособления) составляет от 0,5 часа до 1 часа.

В схеме КФ при определении обратного воздействия конвекции на сеточные поля температуры и влажности рассчитываются тенденции температуры и влажности за счёт конвективных процессов.

Ансамблевая схема Грелла-Дэвени. В данной схеме была предложена ансамблевая параметризация конвекции, в которой идет расчет конвекции по множеству параметризаций в одном узле сетки, а затем результаты усредняются и этот осредненный эффект воздействия конвекции учитывается в каждом узле сетки.

Ансамблевая схема Грелла 3D. Эта схема является модификацией предыдущей. В ней используется гипотеза о квазиравновесном состоянии

между членами ансамбля. Ее отличительной особенностью является учет эффектов опускания масс воздуха в окрестности кучевых облаков [17,18].

Схема Тидтке основана на отдельном описании конвективных и крупномасштабных процессов в атмосферном столбе. Данная схема дает возможность учитывать различные особенности конвекции, например, условную неустойчивость в теплых секторах циклонов умеренных широт, крупномасштабную конвергенцию влаги и турбулентные притоки тепла и влаги в пограничном слое атмосферы. Основными критериями наличия конвекции в атмосфере являются, условная неустойчивость вертикального профиля статической энергии, наличие положительной плавучести и положительного потока массы в неустойчивых слоях атмосферы. В схеме Тидтке отсутствует спектральное представление ансамбля конвективных облаков. Составляющие единый ансамбль конвективные облака в данной схеме могут иметь верхнюю границу на любом модельном уровне [19].

В исследовании для определения устойчивости атмосферы и наличия условий для смерчеобразования анализировались скорость ветра и CAPE за 22BCB 20 июня 2022 года.

CAPE это доступная конвективная потенциальная энергия, которая является мерой возможности и интенсивности конвективной деятельности в атмосфере. Индекс CAPE используется при прогнозе опасных явлений погоды конвективного происхождения, таких как шквалы, смерчи, торнадо, мощные конвективные облака, ливни, грозы и т.п.

На рисунках 2.2 и 2.3 представлены поля модуля скорости ветра и индекса CAPE для времени возникновения смерча на самой мелкой модельной сетке (шаг по горизонтали 1000 м). Чёрным треугольником показано место образования смерча.

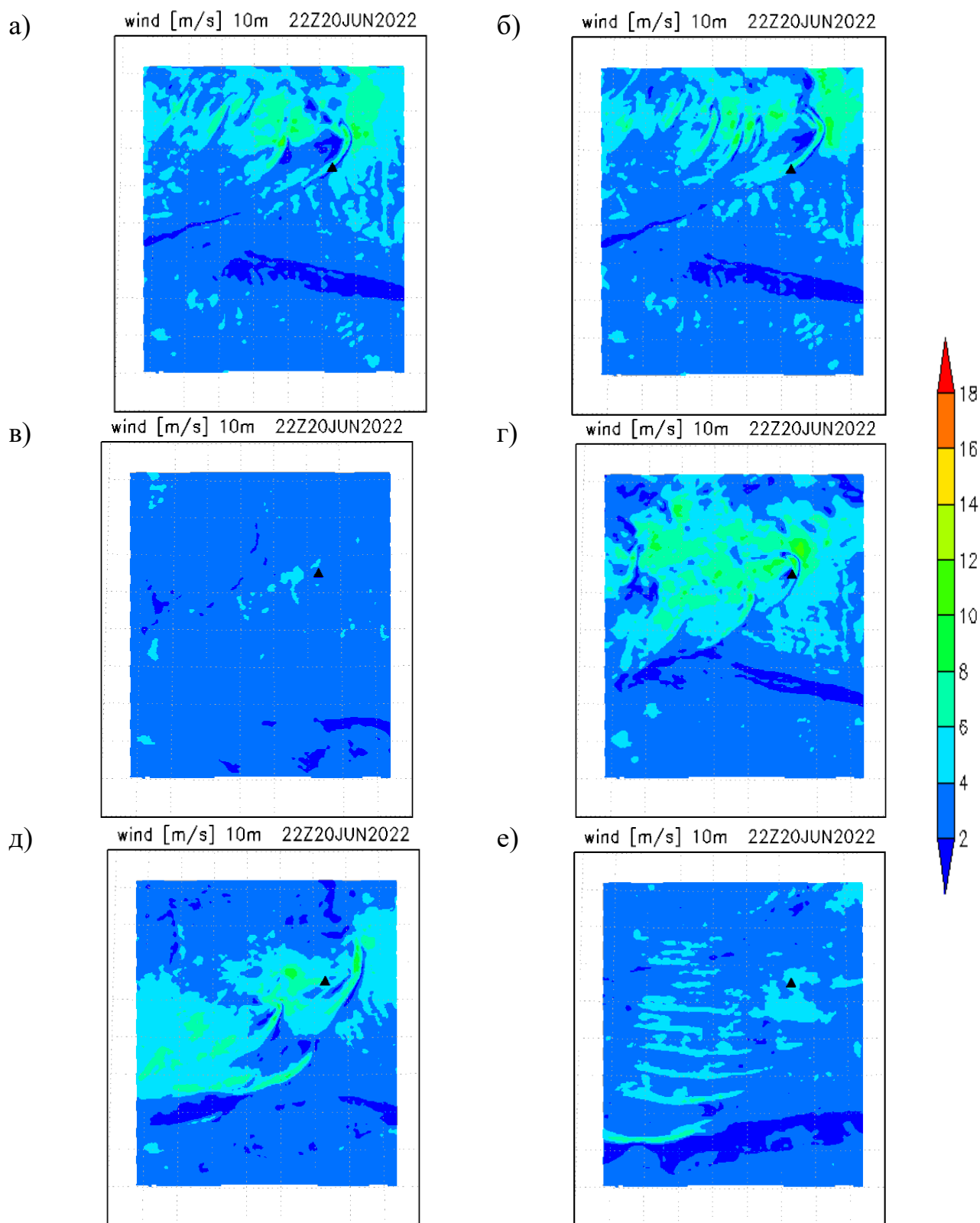


Рисунок 2.2 – Прогностическое поле ветра (м/с) 22:00 ВСВ 20 июня 2022 г. с использованием различных схем параметризации конвекции (а-схема 0, б-схема 1, в – схема 2, г – схема 3, д – схема 5, е – схема 6)

Анализируя результаты, полученные в ходе численного моделирования при помощи разных схем параметризации (таблица 2.1.), можно сделать вывод о том, что модель не воспроизвела увеличение скорости ветра в ходе прохождения смерча над исследуемой территорией.

Ближе всего к действительности модельные поля ветра при использовании схема параметризации конвекции Грелла-Фрейтаса – скорость ветра достигает 8 м/с.

В самой меньшей степени увеличение скорости ветра при прохождении смерча показывает использование схемы параметризации конвекции Беттса-Миллера-Янича .

Интересен тот факт, что модель сама явно воспроизводит примерно такие же поля ветра, как и при использовании лучших (для данных численных экспериментов) схем параметризации конвекции. И модель без параметризации конвекции работает лучше, чем при использовании схем Беттса-Миллера-Янича и Тидтке.

Хотя усиление ветра при прохождении смерча недостаточно моделируется, но в четырёх численных экспериментах область образования смерча всё-таки выделяется.

При анализе полей на других сетках (с шагами 9 и 3 км) картина практически идентичная проанализированной, то уменьшение шага сетки не уточняет результат моделирования смерчопасной ситуации.

Также по возможно получить дополнительные (к уже проанализированным) данные об образовании смерча. При анализе эволюции модельных полей скорости ветра.

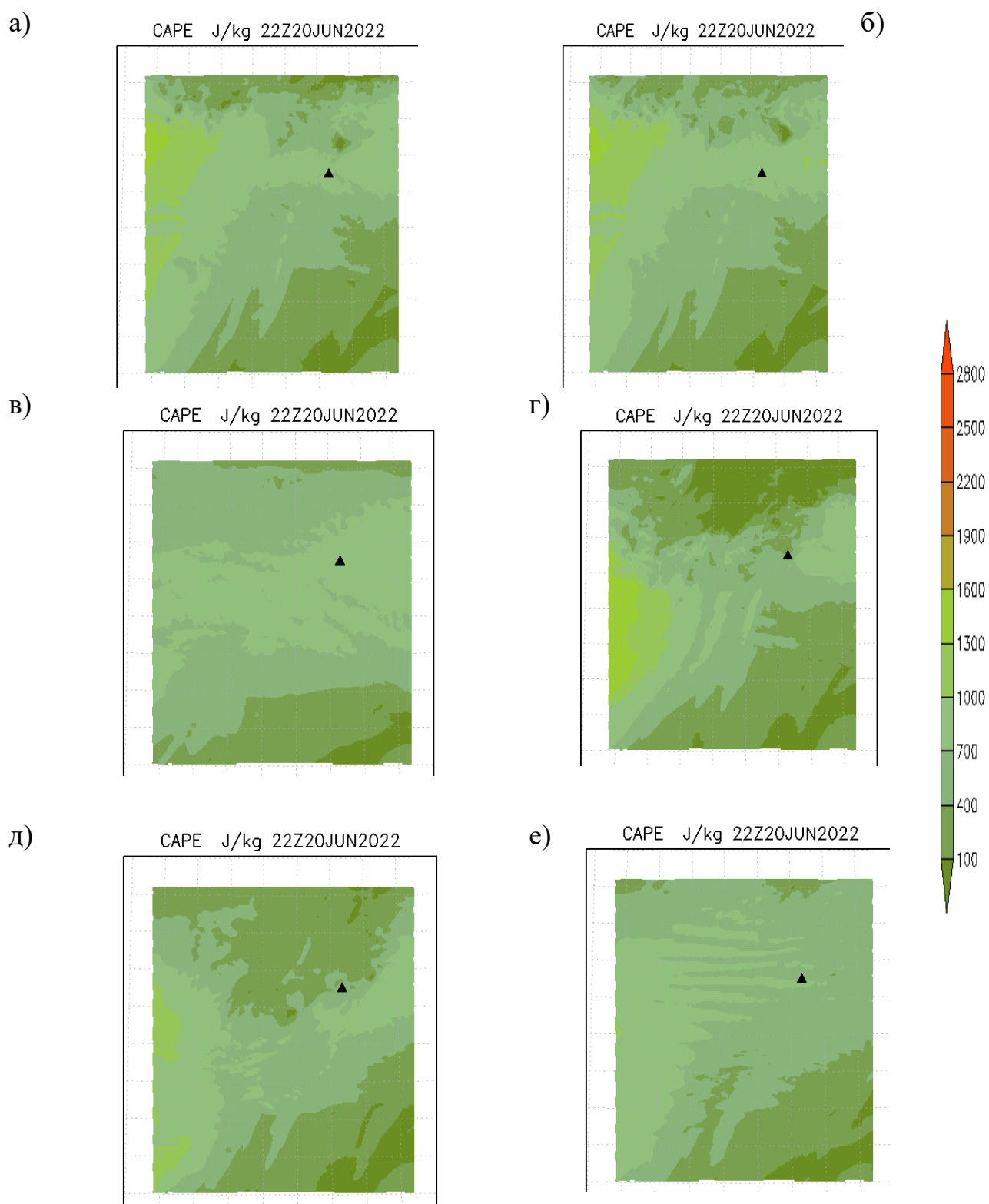


Рисунок 2.3 – Прогностическое поле индекса CAPE (Дж/кг) 22:00 ВСВ 20 июня 2022 г. с использованием различных параметризаций конвекции (а-схема 0, б-схема 1, в – схема 2, г – схема 3, д – схема 5, е – схема 6)

Анализируя поля индекса потенциальной доступной конвективной энергии (рисунок 2.3) можно сделать выводы аналогичные выводам при анализе полей модуля скорости ветра – модель не воспроизводит особенности в поля метеорологических величин, характерные для смерчопасной ситуации. Критерием возникновения сильных кучевых облаков является превышение индексом CAPE значения 1000 Дж/кг, а для экстремальных конвективных процессов индекс CAPE может превышать 5000 Дж/кг.

В анализируемых же полях индекса CAPE значения при использовании схем параметризаций конвекции Беттса-Миллера-Янича и Тидтке не превышают значений обычных (не экстремальных) метеорологических условий. Ближе всего к действительности модельные поля при использовании схема параметризации конвекции Грелла-Фрейтаса и без параметризации конвекции, но область немного повышенных значений индекса CAPE (до 1600 Дж/кг) расположена южнее (схема Грелла-Фрейтаса) или восточнее (без параметризации конвекции) места образования смерча.

Анализируя эволюцию полей индекса CAPE (до времени возникновения смерча и после) нельзя выявить никаких условий, способствующих смерчеобразованию. За несколько часов до наступления смерча в модельной области появляется регион повышенного значения индекса CAPE. Но этот регион существует очень непродолжительное время и не проявляется в полях других метеорологических величин, поэтому трудно связать непродолжительное повышение неустойчивости атмосферы с последующим образованием смерча.

Также как и в случае полей ветра, другие модельные сетки показывают аналогичные результаты.

В статье Лялюшкин А.С., Коломеец Л.И., Хайбуллов М.В., Топтунова О.Н. «Анализ радиолокационных характеристик смерчеобразующих конвективных ячеек» проводится анализ этого же смерча с точки зрения

изучения радиолокационных характеристик и рассмотренный в статье метод прогноза конкретного смерча в районе Бобруйска так же не даёт положительных результатов.

Резюмируя анализ результатов численного моделирования ситуации смерча около Бобруйска, можно сделать вывод о том, что модель не смогла смоделировать смерчопасную ситуацию и эта неудача не связана с разрешением модели. Скорее всего, для более детального моделирования необходимо подбирать оптимальную конфигурацию параметризаций всех физических процессов, а не только конвекции. Большее внимание необходимо уделить параметризации пограничного слоя атмосферы, турбулентности и взаимодействию с подстилающей поверхностью. Для повышения качества и детальности моделирования необходимо разрабатывать схему ассимиляции данных наблюдений (например, радиолокационных) в модель.

2.2 Смерч в Прикамье, 18 июля 2012 года

Характеристики опасных явлений погоды, которые образовались в июле 2012 года, получены из статьи «Исследование условий развития и оценка последствий сильных шквалов в Прикамье 18 июля 2012 года» [20], в которой очень подробно был этот случай проанализирован. Идентификация смерча была сделана по спутниковым снимкам, на которых были выявлены участки сильных ветровалов в лесных массивах. Смерчи наблюдались с 8:00 до 15:00 ВСВ практически по всей территории Пермского края.

Исследование смерчопасной ситуации проводилось на основе математического моделирования с использованием гидродинамической мезомасштабной модели WRF-ARW.

Расчётная область представлена на рисунке 2.4.

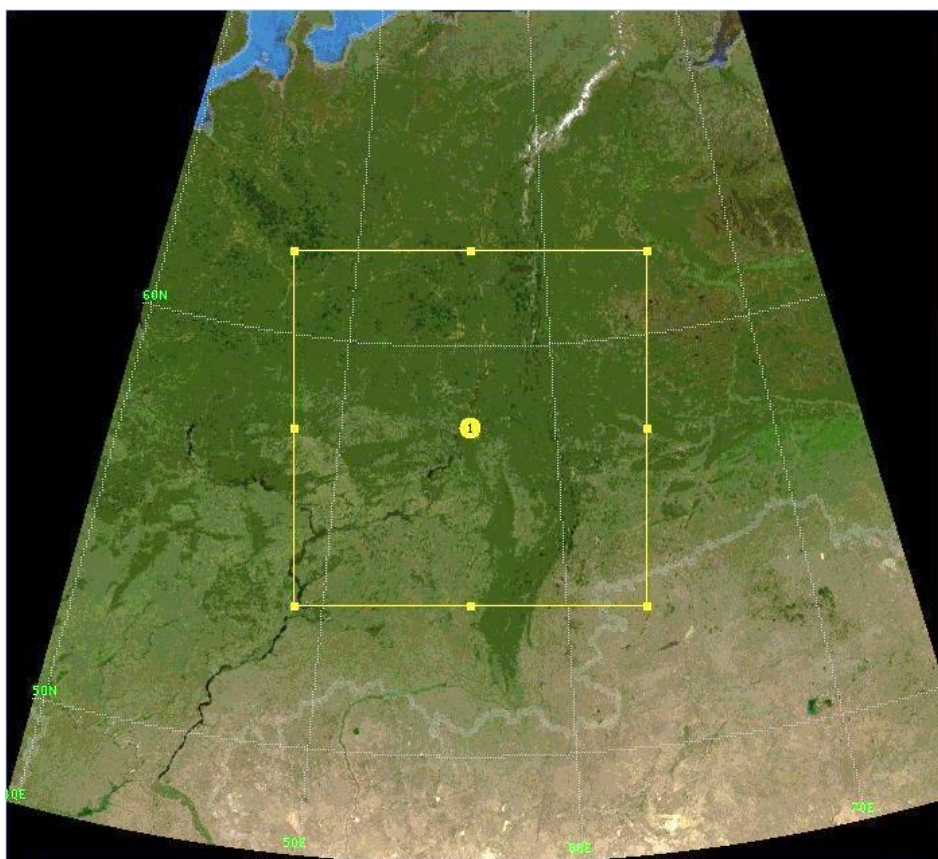


Рисунок 2.4 – Область моделирования смерча 18 июля 2012 г.

Шаг по горизонтальным координатам 5 км, по времени 30 секунд. Заблаговременность прогноза 36 часов с 12:00 ВСВ 17 июля до 00:00 ВСВ 19 июля. По вертикали 35 уровней, верхняя граница модельной атмосферы 50 гПа. В качестве начальных и граничных условий использовался объективный анализ и прогноз GFS. Граничные условия обновлялись каждые 6 часов.

Использовался стандартный набор параметризаций физических процессов, изменялись только методы параметризации конвекции. Используемые схемы параметризации конвекции представлены в таблице 2.2.

В одном из численных экспериментов конвекция не параметризовалось – считалось, что она описывается уравнениями явно.

На рисунке 2.5 представлено прогностическое поле ветра у подстилающей поверхности на 12:00 ВСВ.

Таблица 2.2 Номер опции и названия схем параметризации

Номер опции в управляющем файле namelist.input	Название схемы
0	Схема Беттса-Миллера-Янича [11]
1	Без параметризации конвекции
2	Схема Кейна–Фритша [10]
3	Схема Беттса-Миллера-Янича [11]
5	Ансамблевая схема Грелла–Фрейтаса [12]
6	Ансамблевая 3D схема Грелла [14]
	Схема Тидтке [15]

Анализируя полученные результаты численного моделирования, полученные с использованием разных схем параметризации конвекции, можно сказать о том, что усиление ветра, связанное с прохождением смерча над Пермским регионом, наблюдается при использовании следующих параметризаций:

без параметризации конвекции,
схеме Кейна–Фритша,
схеме Беттса-Миллера-Янича,
ансамблевой схеме Грелла–Фрейтаса.

При использовании ансамблевой 3D схемы Грелла и схемы Тидтке значительное усиление ветра не воспроизводится.

При сравнении видно, что территория прохождения смерча в целом заметно проявляется в полях модуля скорости ветра.

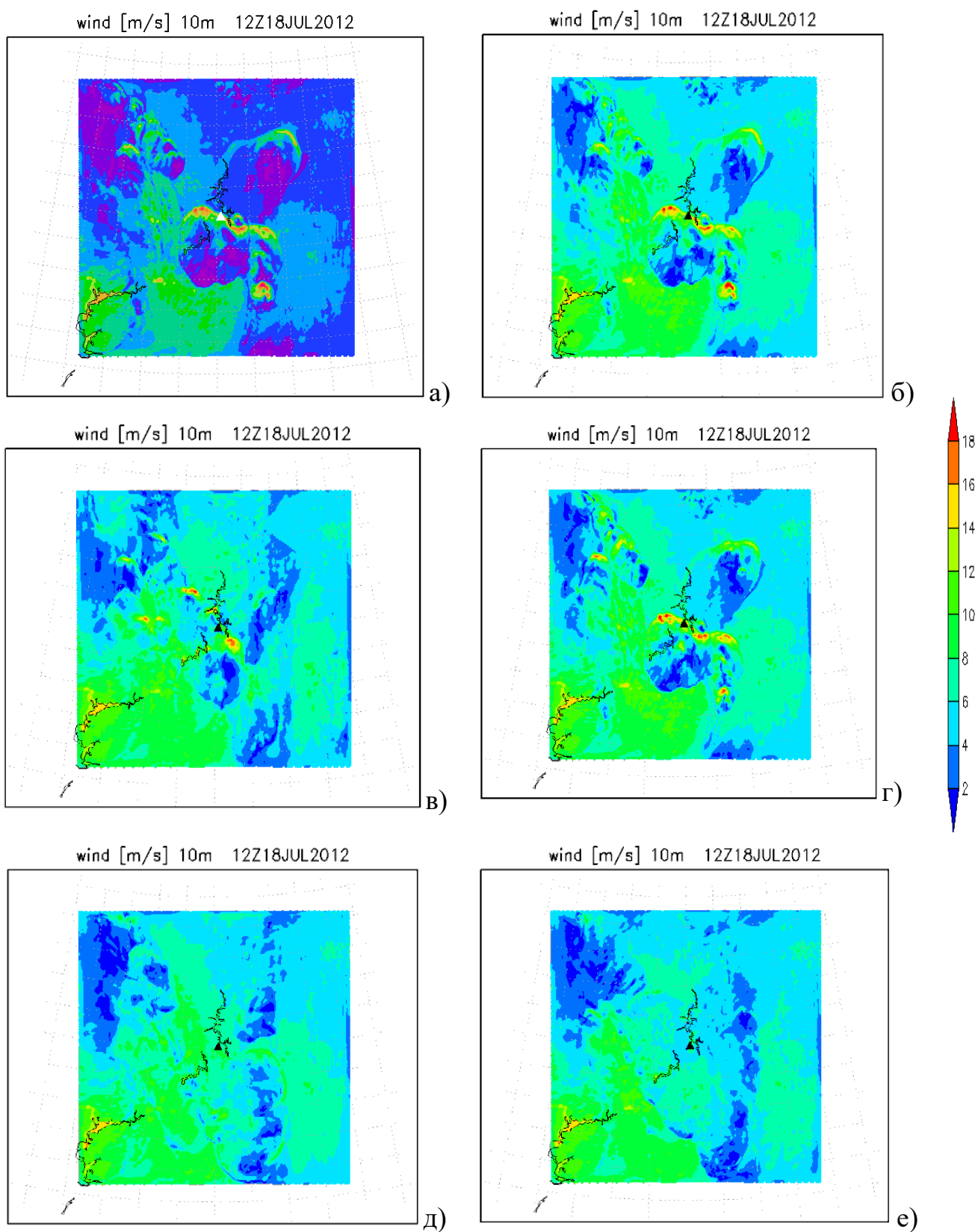
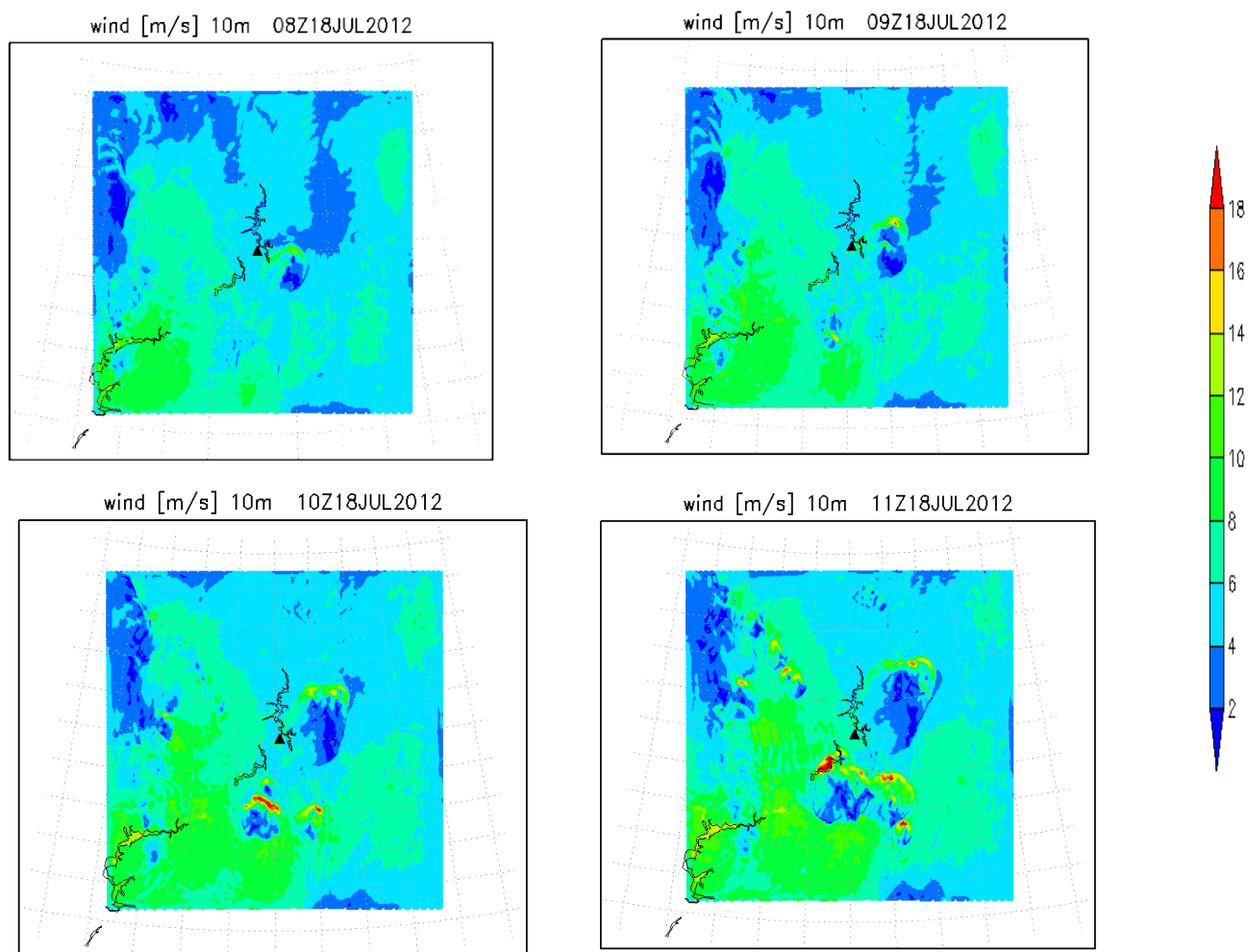


Рисунок 2.5 – Прогностическое поле ветра (м/с) 12:00 ВСВ 18 июля 2012 г. с использованием различных параметризаций конвекции (а-схема 0, б- схема 1, в – схема 2, г – схема 3, д – схема 5, е – схема 6)

Для более подробной анализа эволюции поля скорости ветра при смерчеопасной ситуации рассмотрим поля модуля скорости ветра, полученные при моделировании с использованием ансамблевой схемы Грелла–Фрейтаса для параметризации конвекции. Поля представлены на рисунке 2.6.



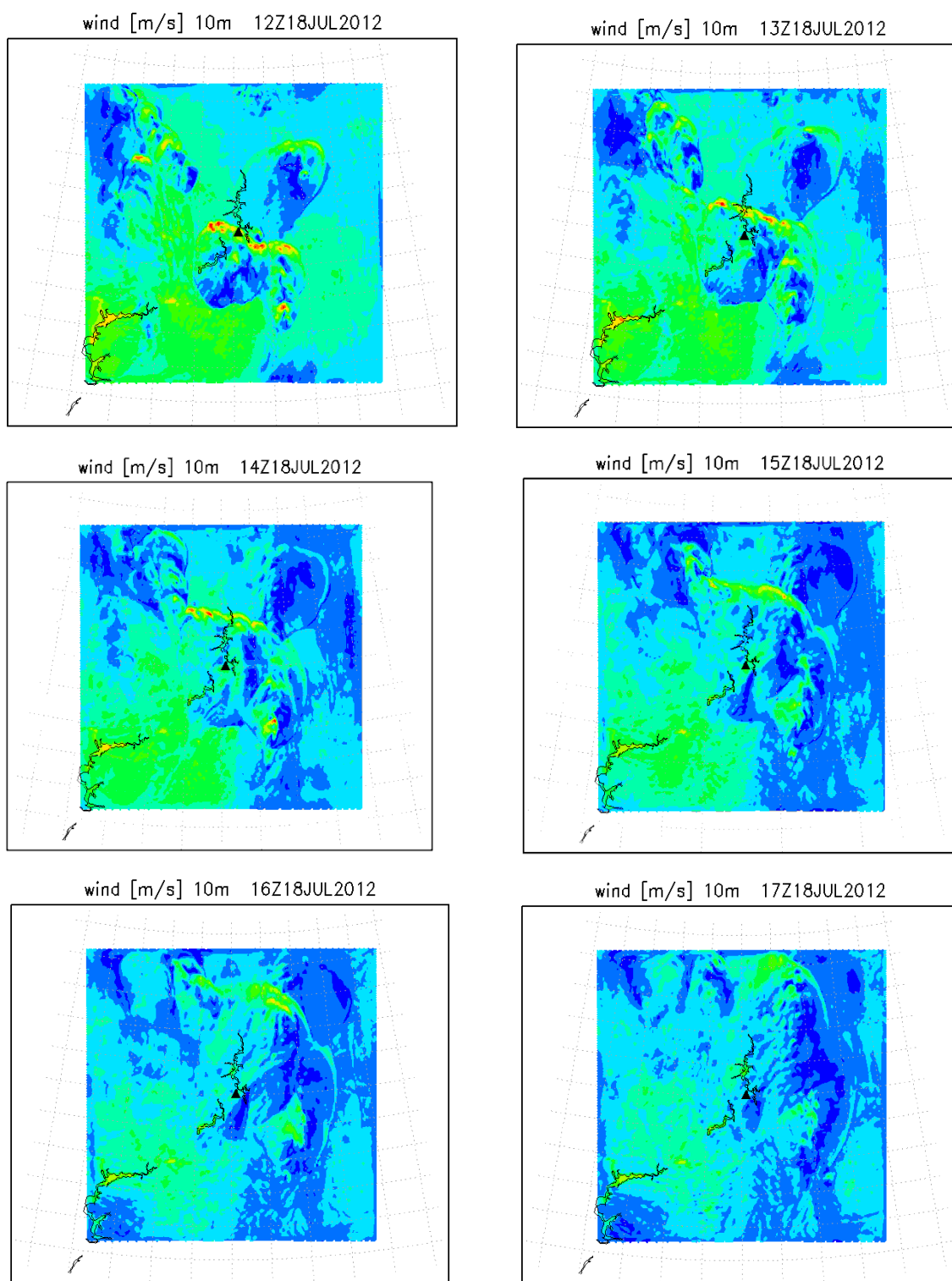


Рисунок 2.6 – Прогностическое поле ветра (м/с) с 08 ВСВ до 17 ВСВ 18 июля 2012 г. с использованием параметризации конвекции ансамблевой схемой Грелла–Фрейтаса

Анализируя результаты, представленные на рисунке 2.6, можно проследить эволюцию поля ветра – в 9:00 появляется область с высокими значениями скорости (до 18 м/с), далее эта область увеличивается в размерах, перемещается на северо-восток и к 15 часам исчезает. Такое поведение поля ветра соответствует фактической ситуации – первые конвективные явления наблюдались с 08 ВСВ 18 июля, значительное усиление ветра отмечалось с 10 ВСВ до 12 ВСВ. По полученным результатам наблюдается прохождение этих потоков с юго-запада на северо-восток через весь Пермский край.

На рисунке 2.7 представлено прогностическое поле индекса CAPE над исследуемой территорией за 12:00 ВСВ, полученное при использовании различных схем параметризации конвекции.

В полной согласованности с прошлыми результатами ведут себя все схемы параметризации конвекции, кроме схему Тидке – именно она диагностирует самую сильную конвективную деятельность (индекс CAPE превышает 2800 Дж/кг).

Схема параметризации конвекции Беттса-Миллера-Янича, как и ранее, показывает самую незначительную неустойчивость на рассматриваемой территории. Это связано, скорее всего, что именно в схеме параметризации конвекции Тидтке используется самый подробный подход к описанию конвективных процессов, рассматриваются восходящие и нисходящие потоки и описывается взаимодействие облака с окружающей средой и подстилающей поверхностью.

Моделирование без параметризации конвекции показывает наличие конвективной неустойчивости.

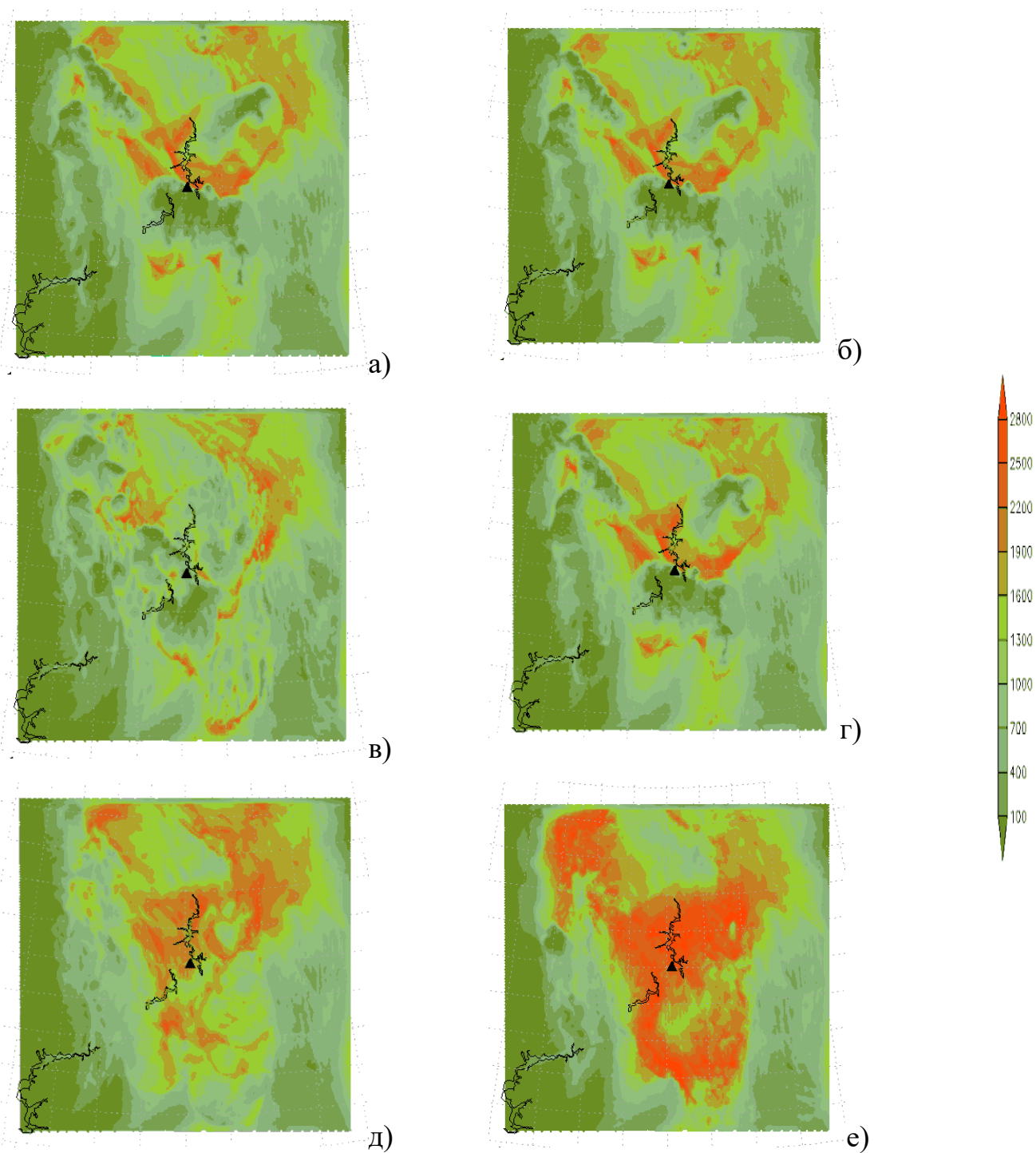
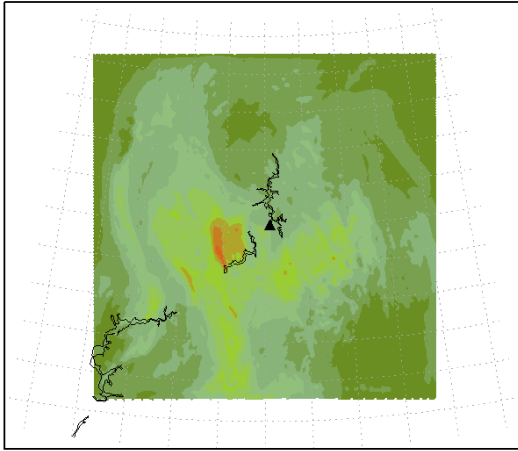


Рисунок 2.7 прогностическое поле индекса CAPE (Дж/кг) 12:00 ВСВ 18 июля 2012 г. с использованием различных параметризаций конвекции (а-схема 0, б-схема 1, в – схема 2, г – схема 3, д – схема 5, е – схема 6)

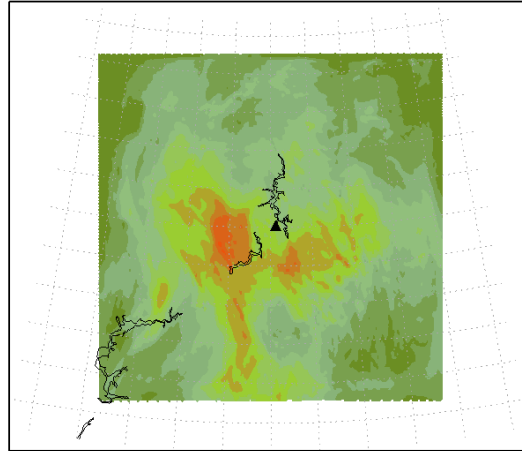
Анализируя полученные результаты, которые были получены в ходе численного моделирования с помощью разных схем параметризации конвекции можно сделать вывод о том, что индекс CAPE, который указывает скорость развития конвективных процессов, связанную с прохождением смерча, наблюдается при всех случаях параметризации и значения были выше критического >2000 Дж/кг. Этот факт говорит о том, что над исследуемой территорией скорость развития конвективных процессов была высокой. В результате сравнения схем параметризации видно, что территория прохождения смерча в целом заметно проявляется во всех использованных схемах параметризации.

Для того чтобы проследить эволюцию процесса смерчеобразования рассмотрим временное развитие поля индекса CAPE при параметризации конвекции по схеме Тидтке, так как результаты по данной схеме показывают самую большую неустойчивость в атмосфере. Вероятность развития конвективных явлений определённой интенсивности по индексу CAPE. Поля индекса CAPE приведены на рисунке 2.8.

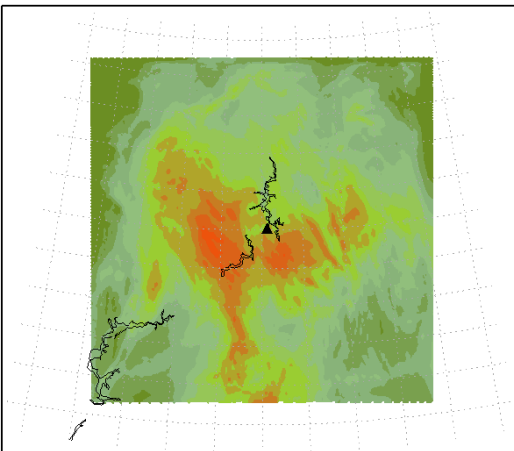
CAPE J/kg 04Z18JUL2012



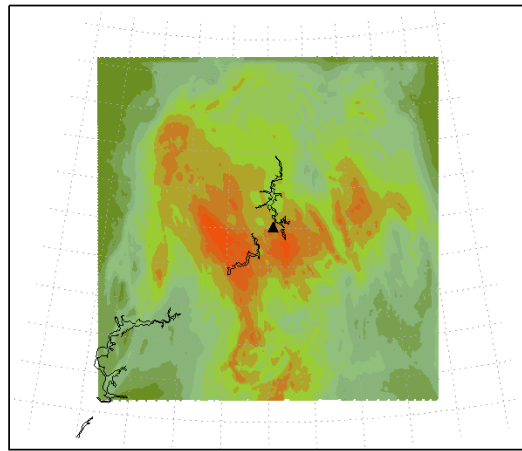
CAPE J/kg 05Z18JUL2012



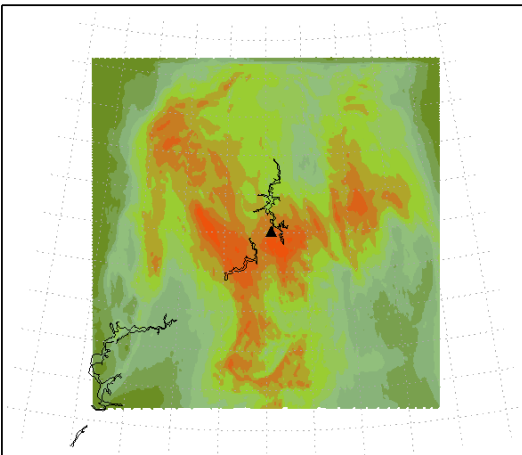
CAPE J/kg 06Z18JUL2012



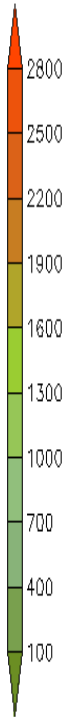
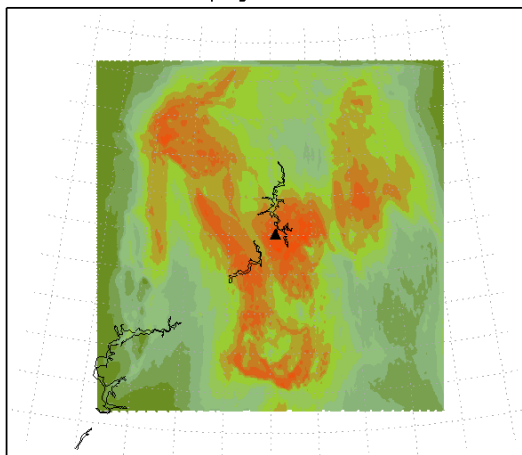
CAPE J/kg 07Z18JUL2012



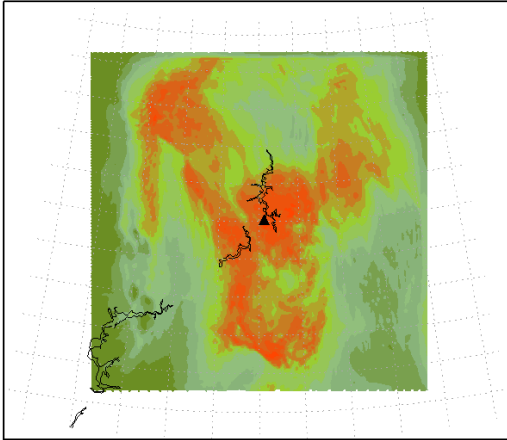
CAPE J/kg 08Z18JUL2012



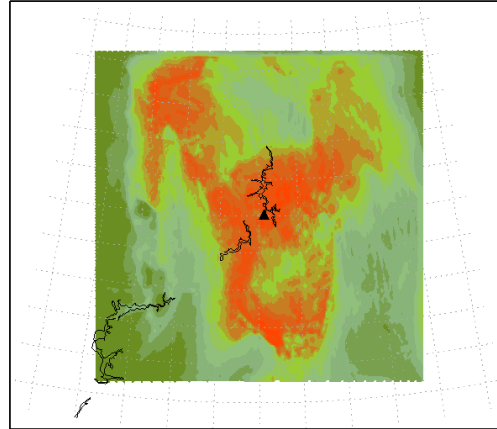
CAPE J/kg 09Z18JUL2012



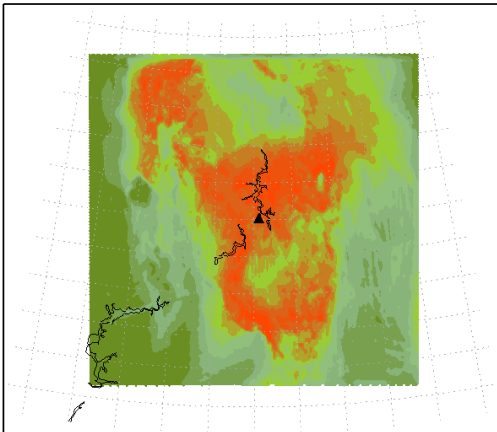
CAPE J/kg 10Z18JUL2012



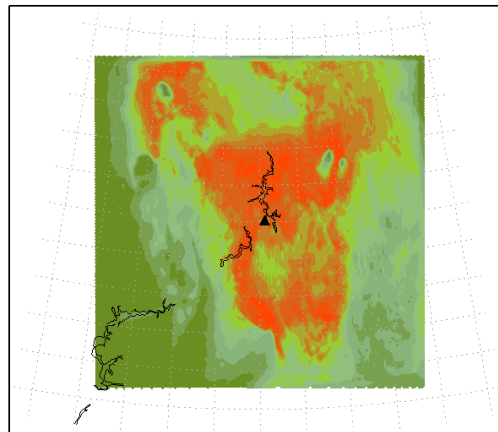
CAPE J/kg 11Z18JUL2012



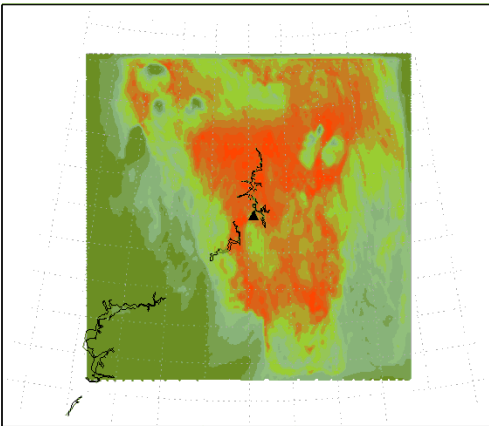
CAPE J/kg 12Z18JUL2012



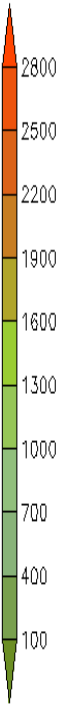
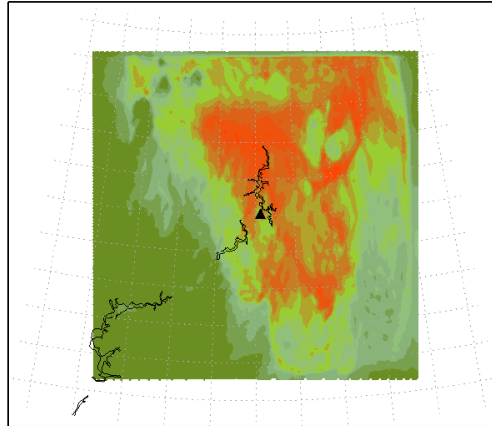
CAPE J/kg 13Z18JUL2012



CAPE J/kg 14Z18JUL2012



CAPE J/kg 15Z18JUL2012



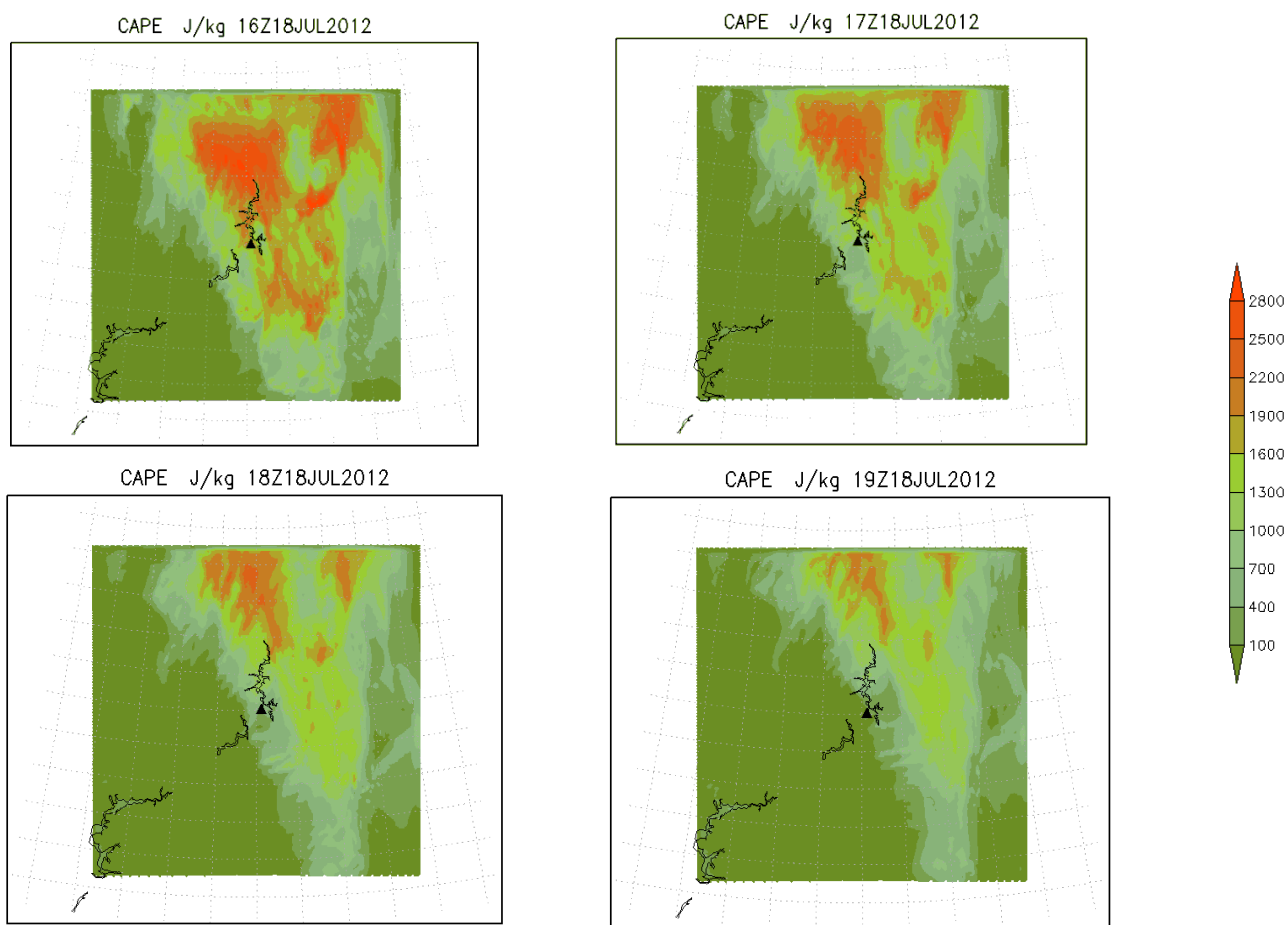


Рисунок 2.8 – Прогностическое поле индекса CAPE с 04 ВСВ до 17 ВСВ 18 июля 2012 г. с использованием параметризаций конвекции схемы Тидтке.

Из полученных результатов видно, что при численном моделировании при помощи схемы Тидтке наблюдается эволюция индекса CAPE, индекс увеличивается, что обусловлено увеличением неустойчивости и в результате созданием смерчеопасной ситуации.

Увеличение индекса CAPE отмечалось с 04 ВСВ 18 июля, далее наблюдается прохождение потоков, усиленных значениями индекса, с юго-запада на северо-восток через весь Пермский край. Периоды, когда смерчи наблюдались, соответствуют максимальным значениям индекса, а значит в этот момент времени атмосфера была неустойчивой и развитие конвективных

процессов, вызывающих смерчи была максимальной. В 19 ВСВ зона активности сместилась на север.

Можно сделать вывод о том, что модель хорошо смогла описать процессы, происходящие в атмосфере над Пермским краем 18 июля 2012 года.

Если сравнивать эти результаты с моделированием предыдущей ситуации, то успешность моделирования связана с большими пространственно-временными масштабами местных атмосферных процессов и большей их интенсивностью.

Для более подробного анализа результатов моделирования рассмотрим и сравним данные моделирования и фактические данные о скорости ветра, полученные из статьи Быкова А.В. «Моделирование и прогноз опасных метеорологических явлений конвективного происхождения на Урале». Рассмотрим скорость ветра на всех метеорологических станциях Пермского края (таблица 2.3 и рисунок 2.9) и сравним их с модельными результатами.

Таблица 2.3 Координаты метеостанции Пермского края (Уральское УГМС)

Метеорологическая станция	Координаты (широта и долгота)	
Пермь	58.0	56.67
Ныроб	60.73	56.72
Вая	60.6	58.38
Чердынъ	60.4	56.52
Усть-черная	60.47	52.63
Коса	59.95	55.0
Гайны	60.28	54.35
Березники	59.38	56.93
Кочево	59.6	54.47
Губаха	58.9	57.5
Кудымкар	59.02	54.65
Добрянка	58.45	56.45
Чермоз	58.77	56.2
Верецагино	58.08	54.68
Бисер	58.52	58.85
Лысьва	58.12	57.78
Кын	57.83	58.65
Оханск	57.72	55.38
Большая соснова	57.68	54.6
Кунгур	57.42	56.93
Оса	57.27	55.43
Ножовка	57.08	54.75
Чайковский	56.75	54.08
Чернушка	56.5	56.13
Октябрьский	56.53	57.22
Глазов	58.13	52.58

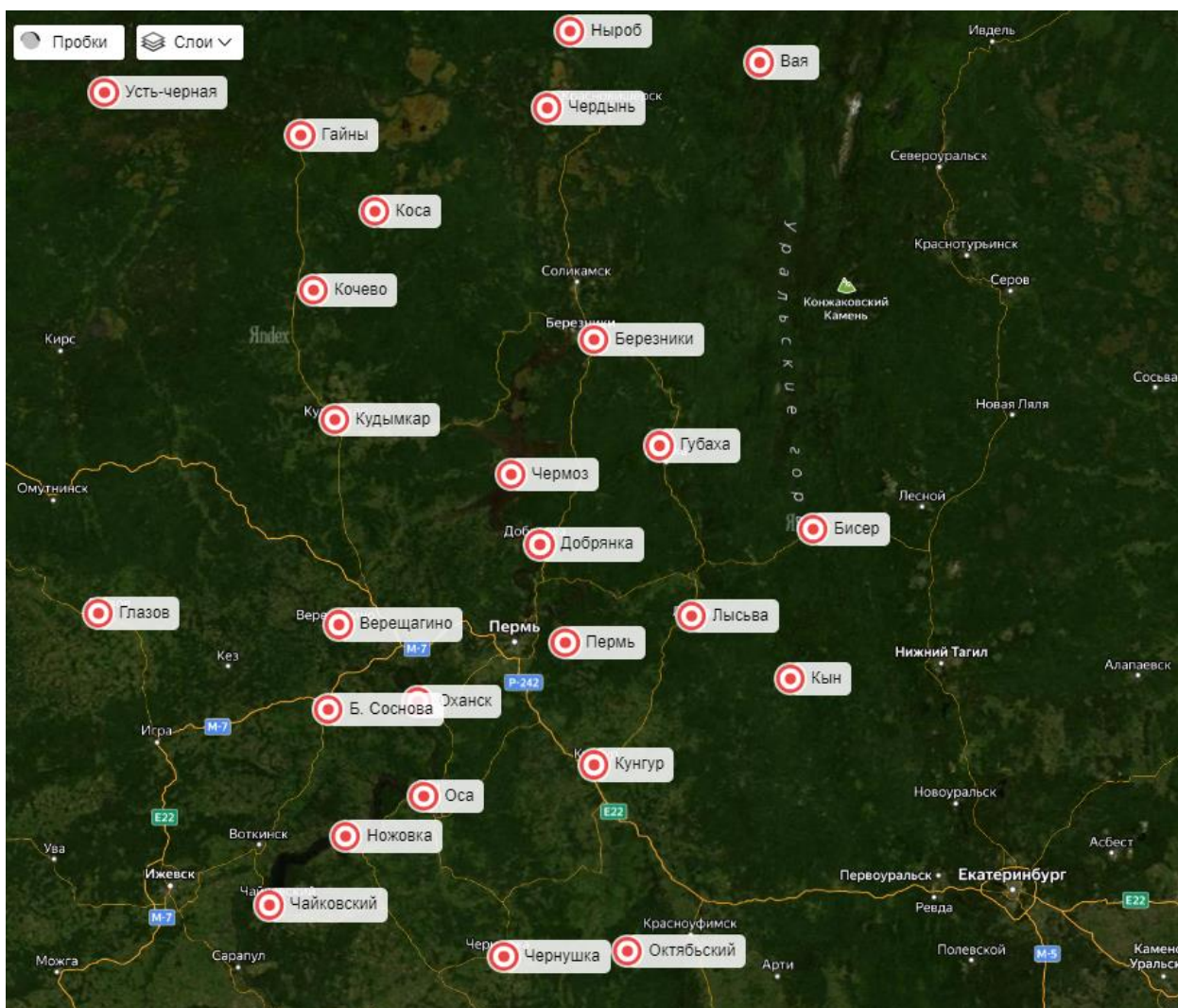
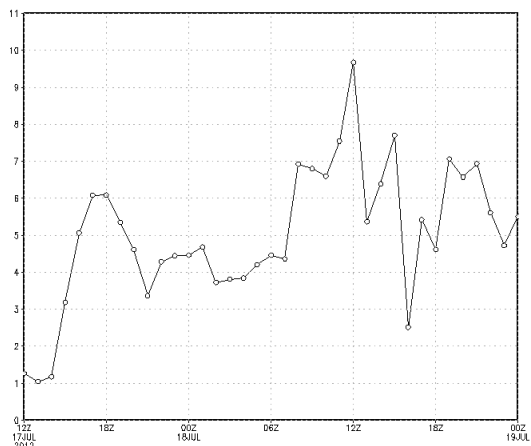


Рисунок 2.9 – Расположение метеостанции Пермского края (Уральское УГМС)

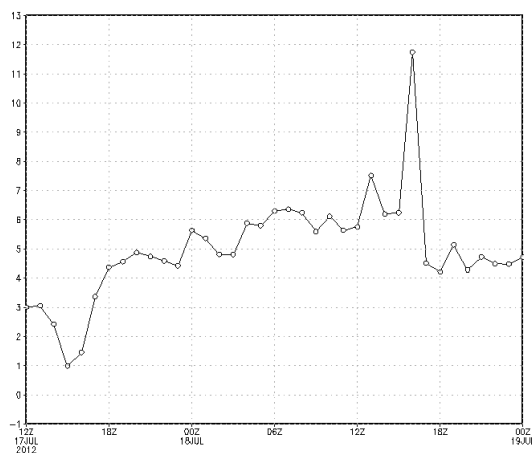
На рисунке 2.10 представлен временной ход скорости ветра за весь рассматриваемый промежуток времени на всех станциях Пермского края, чтобы проследить изменения скорости ветра за период с 12 ВСУ 17 июля до 00 ВСУ 19 июля с дискретностью 6 часов.



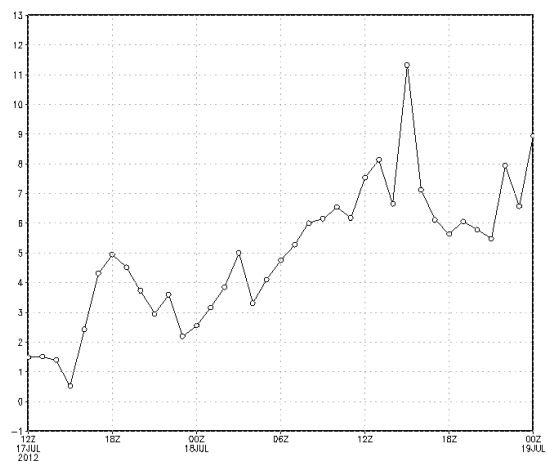
Пермь



Ныроб



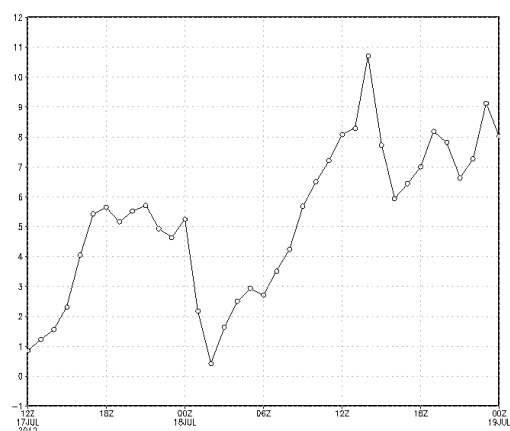
Вая



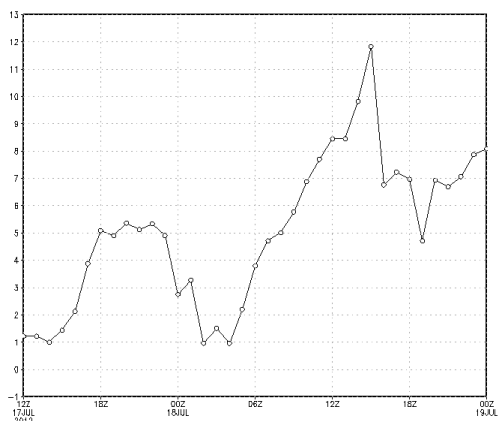
Чердынь



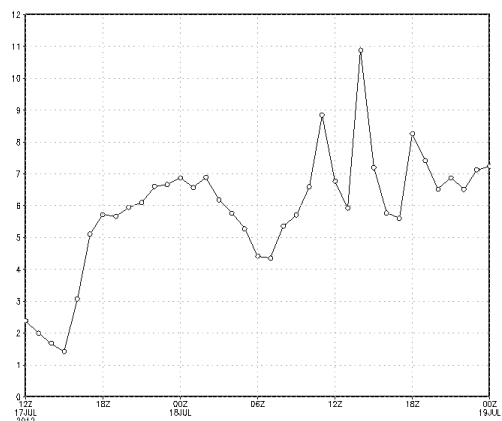
УСТЬ-ЧЕРНАЯ



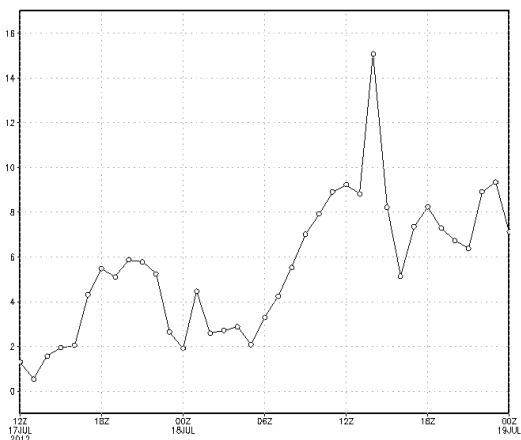
КОСА



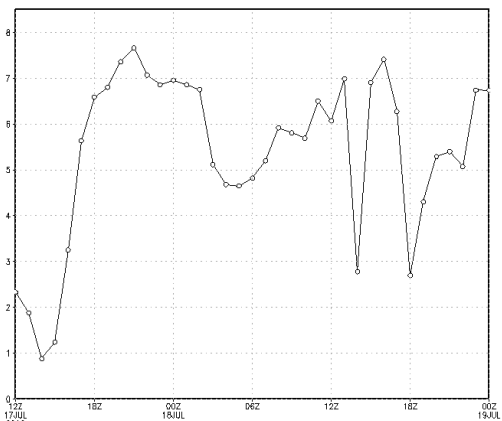
ГАЙНЫ



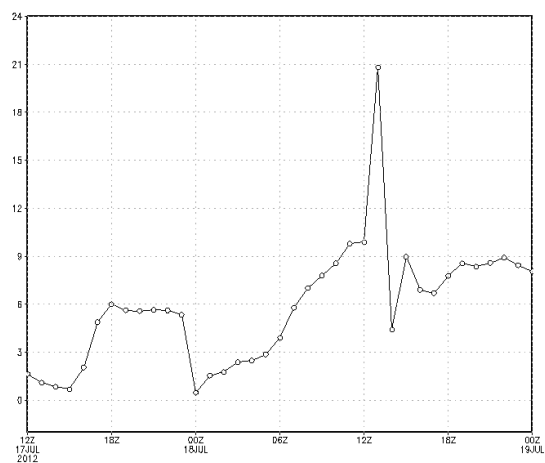
БЕРЕЗНИКИ



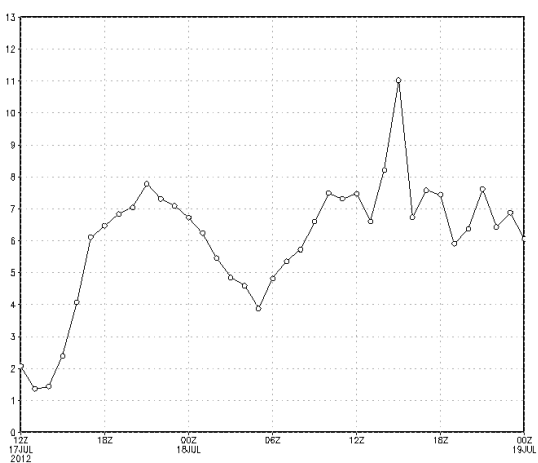
КОЧЕВО



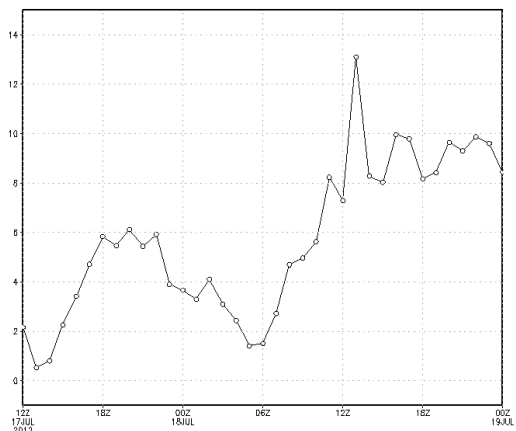
ГУБАХА



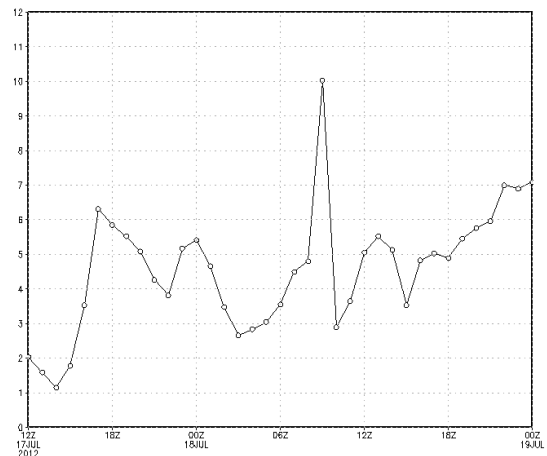
КУДЫМКАР



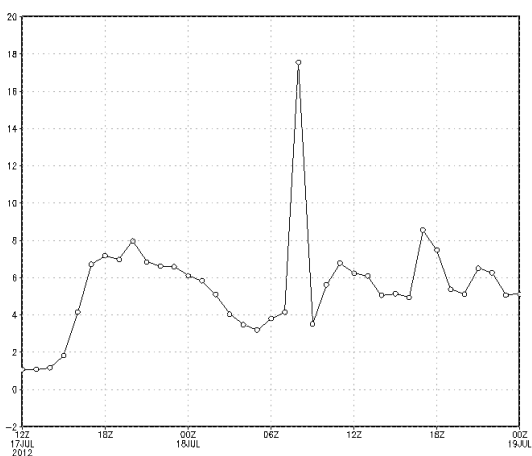
ДОБРЯНКА



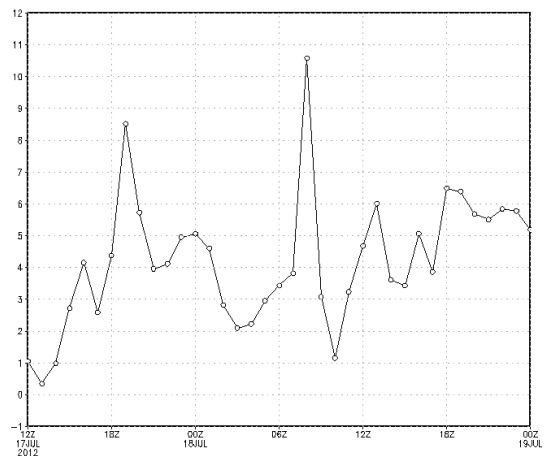
ЧЕРМОЗ



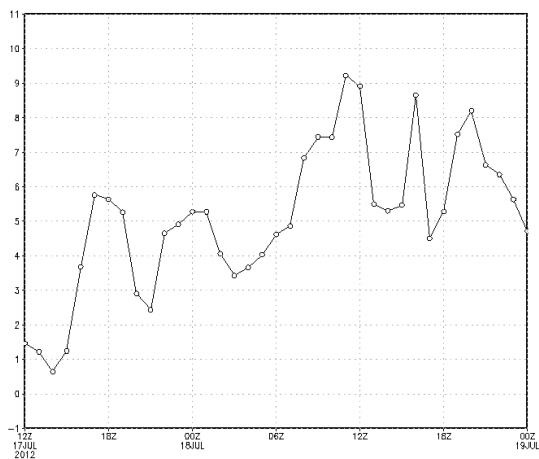
БИСЕР



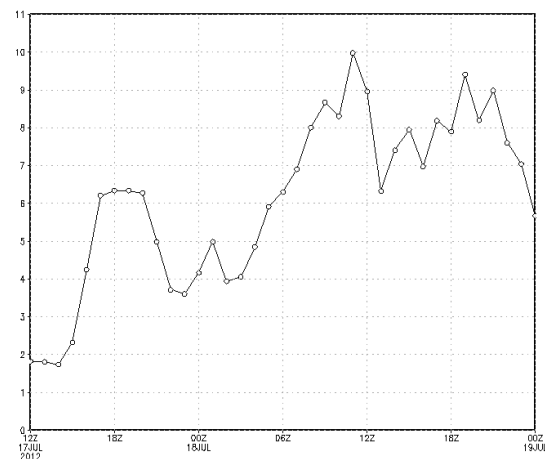
ЛЫСЬВА



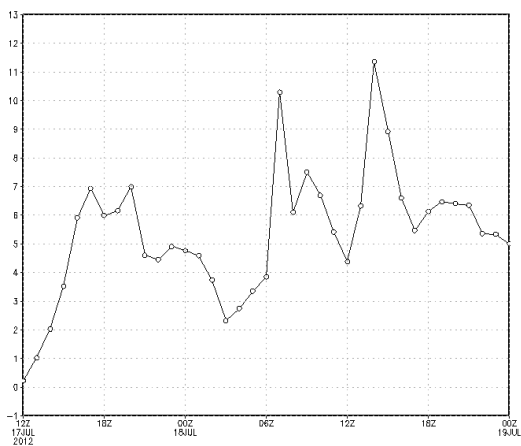
КЫН



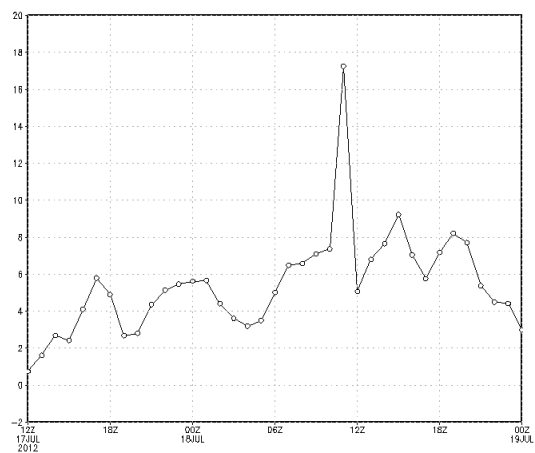
ОХАНСК



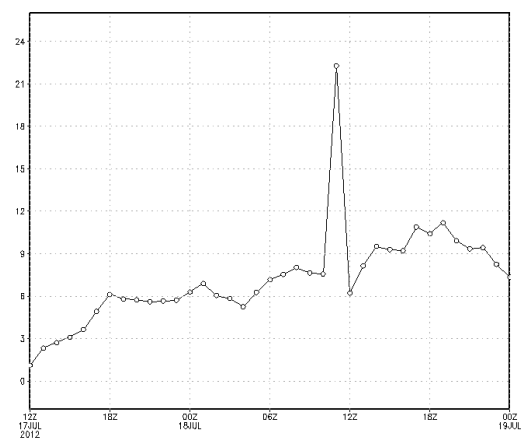
БОЛЬШАЯ СОСНОВА



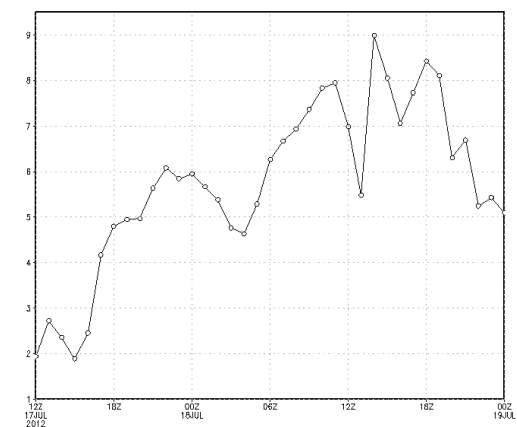
КУНГУР



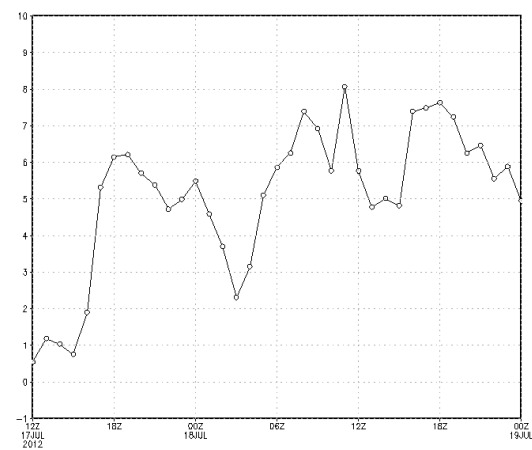
ОСА



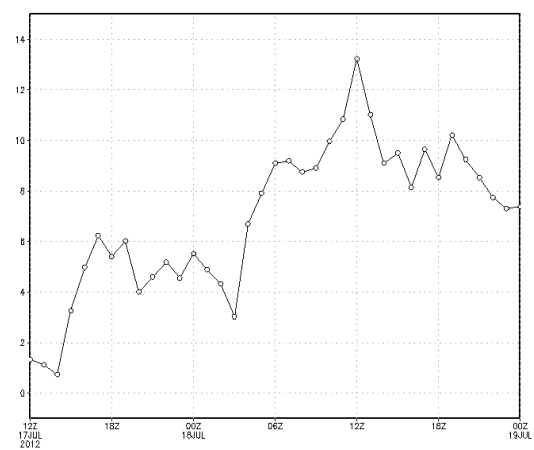
НОЖОВКА



ЧАЙКОВСКИЙ



ЧЕРНУШКА



ГЛАЗОВ

Рисунок 2.10 Графики хода скорости ветра по всем станциями с 12 ВСВ 17 июля до 00 ВСВ 19 июля.

Анализируя полученные результаты в процессе моделирования скорости ветра на всех вышеупомянутых метеостанциях, можно сделать вывод о том, что интенсивный рост скорости ветра наблюдается с 06 ВСВ 18 июля, а ближе к 12 ВСВ и 13 ВСВ наблюдается резкое увеличение, которое наблюдается в большинстве станции. Эти результаты совпадают с прохождением смерча над исследуемой территорией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении можно сказать, что численное моделирование смерча является важным инструментом для изучения и понимания этого мощного и разрушительного явления природы как смерч. В ходе исследования было произведено моделирование данного явления. Была создана специальная версия модели WRF-ARW с разными параметризациями конвекции.

С помощью использованной модели можно оценивать поведение смерча в различных условиях и на разных стадиях его развития, а также прогнозировать его движение и потенциальные последствия.

Однако, несмотря на значительные успехи в развитии численных моделей приспособленных для изучения смерчей, они все еще имеют свои ограничения и недостатки. Например, в первом случае прохождения смерча над Боровицей модель не дала положительных результатов, даже с использованием разных схем параметризации и при вложенных сетках, а во втором случае модель адекватно воспроизвела время развития конвективной системы. получились приближенные результаты, на основе которых можно предположить образование смерча, который прошел по Пермскому краю.

Точность таких моделей в значительной степени зависит от качества и точности входных данных, а также от выбранных параметров и предположений, что может привести к неточным результатам.

Тем не менее, численное моделирование смерча продолжает развиваться, и улучшение точности и реалистичности таких моделей может помочь улучшить наши знания о смерчах и повысить нашу способность предсказывать их движения и последствия в будущем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грищенко, И.В. Шквалы и смерчи на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа / И. В. Грищенко; Arctic Environmental Research, 2009.
2. Смерчи в России. Досье – URL: <https://tass.ru/arhiv/569995> (дата обращения 06.06.2023).
3. Быков, А. В. Моделирование и прогноз опасных метеорологических явлений конвективного происхождения на Урале / А. В. Быков // ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский институт». – Пермь, 2018.
4. Chernokulsky A., Kurgansky M., Igor M., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E. et al. Tornadoes in northern Eurasia: From the middle age to the information era // Monthly Weather Review. 2020. 148. P. 3081–3110.
5. Глобальное потепление – топливо для торнадо? – URL: <https://ru.euronews.com/green/2023/04/07/ru-climate-change-could-make-deadly-us-storms-worse> (дата обращения 16.06.2023)
6. Калмыкова, О. В / «Оценка смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым» // О. В. Калмыкова; ФГБОУ ВО «Научно-производственное объединение «Тайфун»». – Обнинск, 2019.
7. Infrasonic Detection of Tornadoes and Tornadoic Storms URL: https://www.esrl.noaa.gov/psd/programs/infrasound/isnet/Infrasonic_Detection_of_Tornadoes.pdf (дата обращения 01.06.2023)
8. Денисенков, Д. А. «Наблюдение мезоциклона многопараметрическим метеорологическим радиолокатором» / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Г.Г.

Щукин // Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. – 2020. – с. 9-18

9. Торнадо, смерч: что это, как образуется, чем отличаются, классификация, как спастись, фото и видео – URL: <https://kipmu.ru/tornado-i-smerch> (дата обращения 11.06.2023)

10. Kain, John S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. J. Appl. Meteor., 43, 170–181. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2 PDF

11. Janjic, Zavisla I., 1994: The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev., 122, Cop. 927–945

12. Grell, G. A. and Freitas, S. R., 2014: A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, Atmos. Chem. Phys., 14, 5233-5250.

13. Чернокульский А. В., Курганский М. В., Мохов И. И., Шихов А. Н., Ажигов И. О., Селезнева Е. В., Захарченко Д. И., Антонеску Б., Куне Т. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 17–34.

14. Grell, G. A, D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. Geophys. Res. Lett., 29.

15. Zhang, Chunxi, Yuqing Wang, and Kevin Hamilton, 2011: Improved representation of boundary layer clouds over the southeast pacific in ARW–WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme. Mon. Wea. Rev., 139, 3489–3513.

16. Лялюшкин А.С., Коломеец Л.И., Хайбуллов М.В., Топтунова О.Н. :Анализ радиолокационных характеристик смерчеобразующих конвективных ячеек. / А. С. Лялюшкин // Всерос. научн.-практ. конф. «Гидрометеорология и физика

атмосферы: Современные достижения и тенденции развития». – ФГБОУ ВО РГГМУ, 2023.

17. Бутаков Н. Ю. Оценка качества воспроизведения приземной температуры Санкт-Петербурга моделью WRF.: выпускная квалификационная работа / Бутаков Никита Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2020. – 79 с.

18. Гурьянов В.В: Программа дисциплины "Методы математического моделирования и прогноза гидрометеорологических процессов" / 05.03.04 Гидрометеорология.

19. Моделирование общей циркуляции атмосферы и климата / Б. Шнееров, В. П. Мелешко, В. А. Матюгин. [и др.] – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. – 184 с.

20. Ветров А. Л. Исследование условий развития и оценка последствий сильных шквалов в Прикамье / А. Л. Ветров, А.Н. Шихов // Вестник Удмуртского университета. – 2013. – №2. – с. 89-99.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Скрипт для работы с данными моделирования в системе GRADS

```
'reinit'
```

```
'open d02_c6.ctl'
```

```
'set mpdset hires'
```

```
'set grads off'
```

```
'set gxout shaded'
```

```
'set mproj nps'
```

```
tt=1
```

```
while(tt<37)
```

```
'set t ' tt
```

```
'color -var mag(u10,v10) -gxout shaded 2 18 2 -kind blue->aqua->lime->yellow->red'
```

```
'd mag(u10,v10)'
```

```
'cbarn'
```

```
'set lon 27.6 30.3'
```

```
'set lat 52. 54.'
```

```
'q w2xy 29.5 53.3'
```

```
x2=subwrd(result,3)
```

```
y2=subwrd(result,6)
```

```
* eto cvet. chernyy 0, belyy 1
```

```
'set line 1'
```

```
'draw mark 9 ' x2 ' ' y2 ' 0.2'
```

```
'q time'
```

```
time=subwrd(result,3)
```

```
timeGOD=substr(time,9,4)
```

```
timeMON=substr(time,6,3)
```

```
timeDAY=substr(time,4,2)
```

```
timeHOUR=substr(time,1,2)
```

```
'draw title wind [m/s] 10m 'time
```

```
'printim      2risunki6c/veter10_'timeGOD'_ 'timeMON'_ 'timeDAY'_ 'timeHOUR'.png  
white'
```

```
c
```

```
'color -var mcape -gxout shaded 100 2800 300 -kind olivedrab->darkseagreen-  
>yellowgreen->chocolate->orangered'
```

```
'd mcape'
```

```
'cbarn'
```

```
'q w2xy 29.5 53.3'
```

```
x2=subwrd(result,3)
```

```
y2=subwrd(result,6)
```

```
* eto cvet. chernyy 0, belyy 1
```

```
'set line 1'
```

```
'draw mark 9 ' x2 ' ' y2 ' 0.2'
```

```
'q time'
```

```
time=subwrd(result,3)
```

```
timeGOD=substr(time,9,4)
```

```

timeMON=substr(time,6,3)
timeDAY=substr(time,4,2)
timeHOUR=substr(time,1,2)
'draw title CAPE J/kg 'time
'printim 2risunki6c/mcape_'timeGOD'_'timeMON'_'timeDAY'_'timeHOUR'.png
white'
c

```

```

'color -var lcl -gxout shaded -kind plum->orchid->darkviolet->darkmagenta'
'd lcl'
'cbarn'

```

```

'q w2xy 29.5 53.3'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
* eto cvet. chernyy 0, belyy 1
'set line 1'
'draw mark 9 ' x2 ' ' y2 ' 0.2'

```

```

'q time'
time=subwrđ(result,3)
timeGOD=substr(time,9,4)
timeMON=substr(time,6,3)
timeDAY=substr(time,4,2)
timeHOUR=substr(time,1,2)
'draw title LCL [m] 'time
'printim 2risunki6c/lcl_'timeGOD'_'timeMON'_'timeDAY'_'timeHOUR'.png white'
c

```

```
'color -var lfc -gxout shaded -kind midnightblue->dodgerblue->lightseagreen->slateblue'
```

```
'd lfc'
```

```
'cbarn'
```

```
'q w2xy 29.5 53.3'
```

```
x2=subwrd(result,3)
```

```
y2=subwrd(result,6)
```

```
* eto cvet. chernyy 0, belyy 1
```

```
'set line 1'
```

```
'draw mark 9 ' x2 ' ' y2 ' 0.2'
```

```
'q time'
```

```
time=subwrd(result,3)
```

```
timeGOD=substr(time,9,4)
```

```
timeMON=substr(time,6,3)
```

```
timeDAY=substr(time,4,2)
```

```
timeHOUR=substr(time,1,2)
```

```
'draw title LFC [m] 'time
```

```
'printim 2risunki6c/lfc_'timeGOD'_ 'timeMON'_ 'timeDAY'_ 'timeHOUR'.png white'
```

```
c
```

```
tt=tt+1
```

```
endwhile
```