Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

На правах рукописи

Сивков Богдан Алексеевич

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ ТЕПЛОГО ПЕРИОДА НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

> Научный руководитель: доктор географических наук, профессор Н.А. Калинин

Пермь – 2022

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ	
АНАЛИЗА, ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ В	
ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА	11
1.1. Физические и синоптические условия формирования сильных	
осадков теплого периода	11
1.2. Методы прогноза осадков теплого периода	15
2. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ В ТЕПЛЫЙ	
ПЕРИОД ГОДА	29
2.1. Краткое физико-географическое описание Пермского	
края	29
2.2. Пространственно-временное распределение сильных осадков	30
	50
2.5. Осооснности синоптических условии при выпадении сильных	36
24. Особошности новой рортикации и у приходий нов Пормским красм	50
2.4. Особенности полей вертикальных движений над пермеким краем	13
2.5. Особациости тармоницарии осидков теплого периода	43
2.5. Особенности термодинамического состояния атмосферы при	51
	54
лиагноза и прогноза осалков разной	
интенсивности	68
3.1. Применение молели WRF пля прогноза осалков теплого периода	00
5.1. Применение модели with для прогноза осадков теплого периода	68
3 1 1 Характеристики применяемой молели WRF	68
3.1.2 Метолика оценки успешности писленных прогнозов летних	00
осалков разной интенсивности по молели WRF	71
3 1 3 Цистенци и прогног осалков разной интенсивности на	/ 1
территории Vpaga с помощи ю модели WPE	75
	15
9.2. прогноз осадков теплого периода с помощью индексов неустойнирости атмосферы на территории Урада с использованием	
псустоязивости атмосферы на территории у рала с использованием	
	87
выходных данных модели w КГ	87 96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87 96 00
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87 96 99

ВВЕДЕНИЕ

Одним из опасных явлений погоды (ОЯ) в теплое время года является выпадение очень сильных дождей и сильных ливней. Согласно [88] критерием сильного ливня является количество выпавших осадков не менее $30 \ mm$ за период не более $1 \ u$; очень сильного дождя – количество выпавших осадков не менее $50 \ mm$ (а в ливнеопасных (селеопасных) районах не менее $30 \ mm$) за период не более $12 \ u$. Ливнеопасные районы определяются региональным Управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) на территориях его деятельности.

Сильные осадки могут стать причиной возникновения наводнений, оползней, селей, размывания берегов и т.д. Они способны парализовать движение автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта, а также оказывать негативное влияние на работу жилищно-коммунальных служб. В сельском хозяйстве очень сильные и продолжительные осадки приводят к смыву почвы, разрушению сельскохозяйственных угодий, вымоканию урожая, полеганию зерновых в период уборки. Точный и заблаговременный прогноз осадков, особенно сильных, является одной из важнейших проблем в краткосрочном прогнозировании погоды.

Физические процессы, которые приводят к образованию сильных осадков, метеорологические и синоптические условия их образования в целом хорошо известны. Однако при составлении прогнозов на региональном уровне эти условия и закономерности могут претерпевать некоторые изменения вследствие различных особенностей, характерных для территории прогноза. Такими особенностями является географическое положение региона, определяющее климат и преобладающую атмосферную циркуляцию, рельеф местности, наличие или отсутствие крупных водных объектов и др. Поэтому знание региональных особенностей территории, для которой составляется прогноз, является ключевым моментом для точного прогноза.

Общие вопросы, связанные с атмосферной циркуляцией в Пермском крае, изучались еще в конце XX столетия. Однако на данный момент таким исследованиям уделяется довольно мало внимания, в особенности изучению условий, которые способствуют образованию и выпадению сильных осадков достигающих критериев ОЯ. Таким образом, **актуальность** диссертационного исследования определяется необходимостью в получении новых знаний о региональных условиях формирования и распределения сильных осадков теплого периода на территории Пермского края, которые в дальнейшем будут способствовать повышению качества их диагноза и прогноза.

Цель работы: выявление условий формирования сильных осадков теплого периода, достигающих критериев опасного явления на территории Пермского края, для повышения качества их диагноза и прогноза.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Выявление особенностей пространственно-временного распределения сильных осадков в градации ОЯ на территории Пермского края за период 1979–2021 гг.

2. Выявление и систематизация синоптических условий, способствующих формированию сильных осадков.

3. Выявление особенностей полей вертикальных движений и оценка термодинамического состояния атмосферы в период выпадения сильных осадков.

4. Определение возможности применения современных подходов к прогнозу сильных осадков, таких как гидродинамическое моделирование (с помощью модели WRF) и использование индексов неустойчивости атмосферы, рассчитанных на основе выходных данных счета модели.

Объектом исследования являются сильные осадки теплого периода в градации ОЯ.

Предметом исследования являются условия образования сильных осадков на территории Пермского края.

Материалами для исследования послужили:

1. Метеорологические ежегодники и ежемесячники за 1979–2021 гг. и журналы штормовых сообщений WAREP, предоставленные Пермским ЦГМС – Филиалом ФГБУ «Уральское» УГМС, а также открытые источники срочной метеорологической информации.

2. Архив синоптических карт за 2004–2019 гг., предоставленный Пермским ЦГМС – Филиалом ФГБУ «Уральское» УГМС.

3. Данные о скоростях вертикальных движений, геопотенциале, температуре, характеристиках влажности на основных изобарических поверхностях, значения индексов неустойчивости и приземного давления, извлеченные из архива данных глобального атмосферного реанализа модели CFS за 1979–2019 гг.

4. Результаты расчетов гидродинамической модели WRF за июнь 2020 г., включающие прогностические поля накопленных сумм осадков за 12 ч и значений индексов неустойчивости.

Для решения поставленных задач в работе применялись следующие **методы и подходы**:

– для автоматического извлечения данных из архива реанализа CFS и построения синоптических карт были разработаны скрипты (расширения функциональных возможностей) для программного комплекса OpenGrADS;

– для обработки полученных данных из реанализа и прогностических полей модели WRF, результатов расчетов индексов неустойчивости, и создания иллюстраций применялись геоинформационные системы QGIS и ArcGIS;

 – для анализа полученных данных применялся синоптико-статистический подход и методы математической статистики;

– для оценки качества прогноза сильных осадков с применением модели
WRF и индексов неустойчивости атмосферы применялись показатели
успешности в соответствии с [82, 88].

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе анализа пространственно-временного распределения случаев очень сильных дождей и сильных ливней за 1979–2021 гг. установлена тенденция к увеличению числа случаев ОЯ и показано влияние рельефа территории Пермского края на распределение очагов максимальной повторяемости выпадения сильных осадков.

2. Определены области возникновения, траектории смещения и эволюция циклонов, под влиянием которых образовались осадки в градации ОЯ, рассчитаны скорости их смещения, геометрические характеристики, а также проведена систематизация полученных данных.

3. Определены значения скорости вертикальных движений при выпадении сильных осадков в Пермском крае в зависимости от синоптической ситуации, эволюции циклонов, физических условий образования осадков и продолжительности их выпадения, а также температурных условий. Выявлено влияние рельефа на распределение скорости вертикальных движений. На примере вертикальных движений были продемонстрированы факторы, ограничивающие использование реанализа модели CFS при исследовании отдельных кучево-дождевых облаков.

4. Оценены возможности использования индексов неустойчивости, рассчитанные на основе выходных данных модели WRF, для прогноза осадков разной интенсивности, в том числе очень сильных для территории Пермского края. Предложен новый подход для прогноза наличия или отсутствия осадков в пункте прогноза на основе прогностических полей накопленных сумм осадков за 12 ч, который демонстрирует более высокие показатели успешности по сравнению с другими рассмотренными подходами.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования. Результаты представляют собой дальнейшее развитие теории, методологии и практики диагноза и прогноза осадков теплого периода года на региональном уровне. Полученные выводы демонстрируют важность учета региональных особенностей при прогнозе сильных осадков. На основании применения современных подходов к

прогнозированию сильных осадков теплого периода были сформулированы рекомендации по использованию выходных данных мезомасштабной модели WRF и рассчитываемых на их основе индексов неустойчивости применительно к территории Пермского края. Данные рекомендации могут быть использованы синоптиками в оперативной практике для прогноза зон выпадения сильных осадков.

Положения, выносимые на защиту:

1. Анализ пространственно-временного распределения случаев очень сильных дождей и сильных ливней за 1979–2021 гг. позволил установить тенденцию к увеличению их повторяемости и определил степень влияния рельефа территории Пермского края на распределение очагов максимальной повторяемости выпадения сильных осадков.

2. Благоприятные условия формирования сильных осадков на территории Пермского края определяются активностью циклонических систем.

3. Мезомасштабная модель WRF может быть успешно применена для прогноза осадков разной интенсивности на территории Пермского края без использования расчетной сетки с высоким разрешением.

4. Индексы неустойчивости, основанные на методе частицы, могут быть использованы в качестве дополнительных характеристик при оценке возможности выпадения сильных осадков в пункте прогноза.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается значительным объемом случаев с выпадением сильных осадков за продолжительный период времени и исходных материалов, таких, как пополняемый архив данных глобального реанализа модели CFS, данные счета мезомасштабной модели WRF версии 4.2, данные метеорологических наблюдений, индексы неустойчивости; использованием апробированных объективных методов обработки информации, которые применяются как в научных исследованиях, так и в оперативной практике синоптиков; использованием современных и общепризнанных геоинформационных систем и программ, таких как ArcGIS, QGIS и OpenGrADS.

Апробация работы. Основные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, были представлены на следующих конференциях:

1. Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2018», г. Томск, 5–11 июля 2018 г.

 Международная научно-практическая конференция «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы», г. Воронеж, 3–5 октября 2019 г.

3. XIII Всероссийская научно-практическая конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Географическое изучение территориальных систем», г. Пермь, 16–17 мая 2019 г.

4. V Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием, посвященная Международному Дню воды и Дню работника гидрометеорологической службы, и празднованию 75-летия Великой Победы «Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии, водном хозяйстве и геоэкологии», г. Уфа, 20–23 марта 2020 г.

5. Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2020: «Климатические и погодные экстремальные явления: данные, анализ и воздействие» (Weather and Climatic Extremes: Data, Analysis and Impact, WCEDAI), г. Томск, 7–10 сентября 2020 г.

6. Всероссийская конференции с международным участием «Цифровая география», г. Пермь, 16–18 сентября 2020 г.

Результаты, полученные в диссертации, использовались при выполнении НИР, финансируемой РФФИ (проект 17-45-590850 p_a) «Исследование сильных летних осадков на Урале с использованием гидродинамических моделей атмосферы».

По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Все анализируемые результаты работы получены соискателем лично. В частности, осуществлен сбор данных из разных источников о случаях выпадения осадков в градации ОЯ на территории Пермского края за 1979–2021 гг. Автором проведено извлечение и обработка данных из массивов реанализа CFS с помощью разработанных скриптов с последующей интерпретацией результатов применительно к территории Пермского края. Проведена оценка успешности прогнозов осадков разной интенсивности, полученных по результатам счета мезомасштабной модели WRF. Подготовка к печати научных работ, отражающих результаты исследований, осуществлялась как самостоятельно, так и при участии соавторов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 157 наименований, и приложения. Общий объем работы составляет 126 страниц, в том числе 15 рисунков и 39 таблиц. Приложение представлено на 9 страницах.

В первой главе представлен обзор научной литературы, касающейся современного состояния вопроса в области анализа, диагноза и прогноза сильных осадков в теплый период года. Рассмотрены физические и синоптические условия формирования жидких атмосферных осадков, описаны методы и подходы к прогнозу разного типа осадков.

Во второй главе представлено краткое описание физико-географического положения Пермского края. Проведены анализ пространственно-временного распределения случаев с осадками в градации ОЯ, систематизация синоптических ситуаций, при которых складывались благоприятные условия для формирования сильных осадков, оценка термодинамического состояния атмосферы при выпадении сильных осадков. Выполнен анализ полей вертикальных движений в зависимости от синоптической ситуации, эволюции циклонов, физических условий образования осадков и продолжительности их выпадения, а также температурных условий. Показано влияние рельефа на распределение скорости вертикальных движений.

В третьей главе рассматривается применение современных подходов к прогнозу выпадения осадков разной интенсивности. Проведена оценка успешности прогноза осадков с помощью мезомасштабной модели WRF и с применением индексов неустойчивости атмосферы. Сформулированы рекомендации по использованию модельных прогнозов в оперативной практике.

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ АНАЛИЗА, ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА

1.1. Физические и синоптические условия формирования сильных осадков теплого периода

Образование сильных осадков представляет собой сложный физический процесс. Как известно, в образовании осадков принимают участие два основных процесса: конденсация водяного пара и укрупнение облачных элементов за счет коагуляции [2, 67, 80].

На первой стадии развития облака основную роль в формировании облачных элементов играет процесс конденсации водяного пара. Конденсация происходит благодаря небольшому пересыщению водяного пара по отношению к поверхности облачных капель. При появлении в облаке кристаллов льда рост облачных элементов значительно возрастает, так как начинается перегонка водяного пара с переохлажденных капель на кристаллы льда вследствие того, что давление насыщенного водяного пара над водой больше, чем надо льдом.

На второй стадии, после того как капли и кристаллы льда вырастают до радиуса 20–60 *мкм*, преобладающую роль начинает играть процесс коагуляции (слияния) облачных элементов. Слияние облачных элементов за счет различной скорости их падения называется гравитационной коагуляцией. Также коагуляция может быть обусловлена турбулентным и броуновским движением, электростатическими силами и др.

Капли разных размеров падают под действием силы тяжести с различной скоростью, в результате чего они соударяются друг с другом. Однако пока капли мелкие их столкновение и слияние маловероятно. С увеличением размера капель разность скоростей их падения увеличивается, что

обеспечивает все более благоприятные условия для их столкновения и слияния.

В процессе укрупнения облачных элементов и образования осадков важную роль играют вертикальные движения внутри облака. Во-первых, восходящие движения обеспечивают понижение температуры воздуха, благодаря которому в атмосфере наблюдается перенасыщение водяного пара и рост капель за счет конденсации. Во-вторых, капли, поднимаемые восходящими потоками в более высокие слои атмосферы, при падении проходят значительную толщу облака, благодаря чему они увеличиваются в размерах за счет коагуляции. Чем интенсивнее восходящие потоки, тем на большую высоту смогут подняться облачные элементы.

В облаке также можно обнаружить еще один эффект, приводящий к усилению роста капель за счет конденсации. Это эффект разности температуры между облачными элементами. Такая разность образуется благодаря тому, что в облаке существуют как восходящие движения, так и нисходящие. Капли, которые приходят сверху, в среднем оказываются на данном уровне холоднее капель, пришедших на тот же уровень снизу. Так как давление насыщения над холодной каплей меньше, чем над теплой, то начинается перегонка водяного пара с теплой капли на холодную. Эти различия температуры невелики (десятые доли градуса Цельсия), но при высокой положительной температуре они могут играть заметную роль. Для того, чтобы возник эффект конденсации, сравнимый с эффектом появления твердой фазы (кристаллов) в облаке, необходимо, чтобы разность температуры была равна нескольким градусам Цельсия при низкой отрицательной температуре и всего лишь долям градуса Цельсия при высокой положительной температуре. Поскольку большие разности температуры в облаках не встречаются, этот эффект не играет заметной роли в умеренных и высоких широтах, где облака имеют, как правило, низкую температуру, и оказывается существенным в таких широтах, где нижняя часть облаков находится в области высокой положительной температуры.

Так как рост облачных элементов возможен лишь при наличии достаточного для перенасыщения количества водяного пара, то другим важным фактором образования осадков является влагосодержание атмосферы [52, 79]. Исследования показывают, что при низких значениях влагосодержания образуются осадки слабой интенсивности и/или они имеют кратковременный характер [79].

Необходимо отметить, что для образования и выпадения осадков в целом важна микрофизическая структура облачности и ее протяженность по вертикали. В умеренных широтах облака, имеющие капельную или ледяную структуру, довольно редко дают осадки [58, 88]. Переход облака из водяного в смешанное происходит при температуре, которая называется температурой кристаллизации. Она зависит от скорости восходящих вертикальных движений: чем выше скорость, тем ниже значение температуры и тем вероятнее появление в облаке твёрдой фазы.

Протяженность облака по вертикали, при которой возможно выпадение осадков, зависит от температуры воздуха на верхней границе этого облака. Чем выше температура, тем больше должна быть протяженность облака. Таким образом, осадки могут формироваться, когда облако имеет смешанную структуру и достаточную протяженность.

Кроме вертикальных движений и влагосодержания, на формирование сильных осадков оказывает влияние атмосферная циркуляция. Под атмосферной циркуляцией здесь понимается система движений атмосферного воздуха в масштабе всего земного шара (общая циркуляция атмосферы) или над небольшой площадью земной поверхности с особыми свойствами (местная циркуляция) [114].

Изучению циркуляции атмосферы на Урале посвящено достаточное количество работ [11, 12, 112, 119–121]. Проведенные исследования позволили установить, что в течение года наблюдается повышенная повторяемость циклонов по сравнению с антициклонами. При этом активность атмосферных процессов в течение года распределена

неравномерно. Она возрастает с октября и сохраняется в течение зимы, достигая максимума в марте. Наименьшая активность атмосферных процессов отмечается в летние месяцы (июль–август).

Также указанные исследования показали, что погоду на территории Урала и, в частности, Пермского края, определяют в основном западные и северо-западные процессы. Кроме того, в качестве еще одной особенности циркуляционных процессов можно выделить наличие благоприятных условий для цикло- и антициклогенеза, о чем свидетельствует число возникающих местных барических образований.

В синоптических исследованиях осадки обычно подразделяются на фронтальные и внутримассовые. Качественная связь между атмосферными фронтами и выпадением сильных осадков довольно хорошо известна [4, 38, 47, 50, 58, 75, 80, 84, 106, 132]. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что сильные осадки преимущественно связаны с прохождением фронтов, а не с внутримассовыми процессами. Это объясняется тем, что чисто термическая конвекция редко приводит к образованию мощных конвективных облаков, из которых выпадают особо опасные в плане интенсивности осадки. Для их образования необходимо наличие динамического подъема воздуха при сочетании с термическими факторами.

Если рассматривать зависимость сильных осадков от типа фронта, то результаты исследования свидетельствуют о том, что чаще всего сильные осадки образуются на холодных фронтах и фронтах окклюзии по типу холодного. При этом наблюдаются большие контрасты температуры воздуха на поверхности 850 гПа при дивергенции воздушных масс в верхних слоях тропосферы, которая способствует развитию мощных кучево-дождевых облаков. Также стоит отметить, что сильные дожди чаще всего связаны с медленно перемещающимися и малоподвижными фронтами, так как при большой скорости перемещения фронта осадки распространяются на большую территорию и их общее количество не достигает градации опасного явления.

Реже всего сильные осадки наблюдаются на теплых фронтах. В этих случаях атмосфера стратифицирована влажнонеустойчиво. Кучево-дождевые облака чаще всего замаскированы слоистыми облаками (затопленная конвекция).

На образование и распределение осадков значительное влияние оказывает рельеф местности [38, 47, 58, 63, 70, 107, 109, 113]. Возвышенные формы рельефа одновременно могут способствовать как усилению осадкообразования, так и его ослаблению. Так на наветренной стороне холмов и гор за счет вынужденного подъема воздуха увеличивается интенсивность восходящих движений, что способствует обострению атмосферных фронтов, поэтому осадков в горах выпадает существенно больше, чем на окружающих их равнинных территориях. На подветренной стороне, наоборот, наблюдаются нисходящие потоки, которые способствуют рассеиванию облачности и уменьшению количества выпадающих осадков.

Стоит отметить, что в умеренных широтах на распределение осадков даже на равнинной местности могут влиять элементы рельефа с относительными высотами более 50 *м* [107, 109, 113] При этом увеличение количества осадков начинается тем раньше и происходит тем значительнее, чем больше высота горного препятствия [63].

1.2. Методы прогноза осадков теплого периода

Согласно [88] в прогнозах погоды и штормовых предупреждениях указывается количество осадков, их фазовое состояние, время начала и окончания выпадения осадков, а также продолжительность осадков. В тексте прогноза общего назначения конкретное количество осадков не указывается, а используются термины, которым соответствует некоторый диапазон количества осадков (без осадков, небольшие, умеренные, кратковременные, сильные и очень сильные осадки). Несмотря на то, что методы и подходы к прогнозированию постепенно улучшаются, точный прогноз осадков до сих

пор является одной из труднейших задач в метеорологии. Особенно это касается ливневых осадков и осадков достигающих критериев опасного явления.

В общей схеме прогноза выпадения осадков можно выделить несколько этапов [58]:

1. Прогнозируется образование, перемещение и эволюция облачности, дающей осадки, особенно фронтальной облачности, с которой связано преобладающее число случаев выпадения осадков.

2. Прогнозируется перемещение существующей зоны осадков и ее изменение в зависимости от эволюции облачности, циклона и фронта.

3. Прогнозируется положение изотермы –10°С. От ее расположения относительно верхней границы облаков зависит фазовое состояние элементов облачности. Если изотерма проходит между нижней и верхней границей облака, то облако будет состоять как их капелек дождя, так и из кристалликов льда и в этом случае следует ожидать выпадения осадков. Если изотерма будет располагаться выше или ниже облака, то облако будет иметь либо капельную структуру, либо ледяную соответственно. В обоих этих случаях существенные осадки образоваться не смогут.

Фазовое состояние осадков прогнозируется с учетом ожидаемой температуры воздуха у поверхности земли и высоты изотермы 0°C [58]. Эмпирическим путем было определено, что если нулевая изотерма находится на высоте более 500 *м* и температура воздуха в приземном слое при этом выше 3°C, то выпадает только дождь. Если же высота изотермы 0°C менее 500 *м*, а температура воздуха в приземном слое ниже -3° C, то в этом случае выпадает снег или мокрый снег.

Для прогноза обложных осадков применяются такие методы прогноза, как метод Е.М. Орловой [91], метод из «Руководства по краткосрочным прогнозам погоды» [88] и др.

В основе метода Е.М. Орловой лежит формула А.Ф. Дюбюка по расчету индивидуального изменения массовой доли водяного пара в насыщенном воздухе, перемещающемся по вертикали и по горизонтали:

$$Q = \frac{1}{g} \int_{0}^{t} \int_{p_0}^{p} \frac{dq_m}{dt} dp dt, \qquad (1.1)$$

где Q – количество воды, сконденсировавшейся за время δt в столбе воздуха единичной площади, находящемся между изобарическими поверхностями p и p_0 ; q_m – массовая доля водяного пара в состоянии насыщения.

При этом считается, что весь появившийся после конденсации избыток влаги в уже образовавшемся облаке выпадает в виде осадков.

После интегрирования формула (1.1) Е.М. Орловой была приведена в виду:

$$Q_{o\delta \pi} = 1,5\Delta q_{m850} + 1,8\Delta q_{m700} + \Delta q_{m500}, \qquad (1.2)$$

где $Q_{o\delta n}$ – ожидаемое количество обложных осадков (*мм*) за время δt ; Δq_{m850} , Δq_{m700} , Δq_{m500} – изменение массовой доли водяного пара в перемещающемся по вертикали и горизонтали насыщенном воздухе (‰) у поверхности 850, 700 и 500 гПа.

Также Е.М. Орловой были предложены поправки для случаев, когда на поверхности 500 гПа наблюдаются большие значения вертикальных скоростей и случаев, когда верхняя граница не достигает поверхности 500 или 700 гПа.

Кроме того, необходимо обращать внимание на значения дефицита влажности и на контрастность фронтов. Если ожидается большой дефицит влажности в подоблачном слое, необходимо расчетное количество осадков уменьшить, а в зонах хорошо выраженных атмосферных фронтов расчетное количество осадков необходимо увеличить, так как интенсивность восходящих движений чаще всего больше рассчитанных.

В основе метода из Руководства лежит учет таких осадкообразующих факторов, как условия увлажнения и характер вертикальных движений в

атмосфере. На первом этапе необходимо построить траекторию частицы на 24 Ч. Далее вычисляются лапласиан приземного давлении и лапласиан геопотенциала на поверхности 700 гПа в начальной точке траектории по фактическим картам и в пункте прогноза по прогностическим картам. По с полученным значениям лапласиана использованием номограмм определяется скорость вертикальных движений на поверхности 850 и 700 гПа. Далее в начальной точке траекторий на картах AT₈₅₀ и AT₇₀₀ определяются значения температуры точки росы и дефицита температуры точки росы. По дефицита температуры точки росы вычисляются скорости значению вертикальных движений, необходимые для конденсации влаги на поверхностях 850 и 700 гПа. Далее находят разность между скоростью вертикальных движений на поверхностях 800 и 700 гПа и скоростью вертикальных движений, необходимой для конденсации влаги. Если эта разность отрицательная, то по номограммам определяется количество осадков на поверхность 850 и 700 гПа. Их сумма и будет являться прогностическим количеством осадков.

Прогноз сильных ливневых осадков тесно связан с прогнозом кучеводождевой облачности. Разработкой прогнозов конвекции занимались такие ученые как Н.В. Лебедева [58], Г.Д. Решетов [99, 100], Н.С. Шишкин [118], И.А. Славин [58] и др. Данные методы прогноза конвективной облачности и ливневых осадков основываются на расчете параметров конвекции: уровня конденсации и конвекции, энергии неустойчивости, толщины конвективнонеустойчивого слоя, отклонения кривой состояния от кривой стратификации, вертикального градиента температуры, дефицита точки росы и его суммы на некоторых изобарических поверхностях, высоты верхней границы облачности и температуры на этом уровне, скорости восходящих потоков и др.

В последнее время для прогноза конвективной облачности, сильных осадков и других конвективных явлений часто применяются индексы неустойчивости атмосферы [18, 21–23, 44–46, 51, 67, 89, 116, 125, 128, 135, 138, 140, 141, 144]. Такие индексы описывают процессы конвекции не

напрямую, а косвенно. Их сущность состоит в том, что на основе данных о скорости и направлении ветра, влажности и температуры воздуха на определенных высотах или изобарических поверхностях, рассчитываются характеристики, по которым определяется вероятность возникновения того или иного конвективного явления. Для каждого индекса устанавливаются критерии, превышение которых указывает на высокую вероятность возникновения конвективного явления. Например, для индекса САРЕ («энергия неустойчивости») установлены следующие критерии: значениям от 0 до 1000 Дж/кг соответствует слабая неустойчивость атмосферы. При этом вероятны слабые ливневые осадки. При значениях 1000–2500 Дж/кг отмечается умеренная неустойчивость с ливнями, грозами и шквалами. Значениям САРЕ равным 2500–3500 Дж/кг соответствует сильная неустойчивость, при значениях свыше 3500 Дж/кг – очень сильная неустойчивость с сильными и очень сильными грозами, шквалами и градом [135]. Для индекса К (K-index), характеризующего совместное влияние стратификации температуры и содержания водяного пара значения в диапазоне 25–30°С соответствуют слабо неустойчивой атмосфере, 30–35°С – умеренно неустойчивой, 35-40°С – сильно неустойчивой и свыше 40°С – крайне неустойчивой атмосфере [135].

В зависимости от того, какие данные об атмосфере используются, индексы неустойчивости можно разделить на несколько групп:

- индексы, основанные на методе частицы;

– индексы, для расчета которых необходима информация о параметрах ветра на различных высотах или изобарических поверхностях;

 индексы, рассчитываемые на основе температурно-влажностных характеристиках атмосферы;

- комплексные индексы, использующие первые три подхода.

Период конца XX – начала XXI вв. ознаменовался в метеорологии в мировом масштабе заметными успехами гидродинамического моделирования и численного прогнозирования атмосферных процессов, особенно в области

негидростатических мезомасштабных моделей. способных создания воспроизводить конвекцию непосредственно, без использования каких-либо процедур параметризации, применяемых в гидростатических моделях [2]. Разрешающая способность сетки моделей, порядка 1 км, позволяет моделировать кучево-дождевое облако с горизонтальным и вертикальным размером порядка 10 км, а разрешение сетки несколько сот метров – эволюцию скоплений таких облаков. Вычислительная техника в ведущих мировых научных центрах позволяет использование такого горизонтального разрешения мезомасштабных моделей в практических целях.

В мире разработано достаточное количество глобальных и мезомасштабных моделей. Среди глобальных моделей можно выделить следующие [21]:

 – Модель ECMWF, разработанную в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды и являющуюся мировым лидером среди среднесрочных моделей [110, 134].

– Модели GFS (Global Forecast System) и CFS (Climate Forecast System), разработанные в NCEP (National Centers for Environmental Prediction), США.

– Модель GEM (Global Environment Multiscale), разработанную в СМС (Canadian Meteorological Center), Канада.

– Модель ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении абсолютного вихря), разработанную в Институте Вычислительной Математики РАН и применяемую в Гидрометцентре России в качестве оперативной [111].

– Модель ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic), разработанную в DWD (Deutscher Wetter Dienst), Германия.

– Модель GSM (Global Spectral Model) разработанную в JMA (Japan Meteorological Agency), Япония.

Кратко с этими моделями можно ознакомиться в работе [21].

Наиболее популярными в России мезомасштабными моделями являются модель WRF (Weather Research Forecasting) и модель COSMO (the Consortium

for Small-scale Modelling). Модель WRF разработана Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR) совместно с университетом Пенсильвании. Ее особенностью является то, что исходный код модели находится в свободном доступе, и она без ограничений может быть установлена на разные вычислительные платформы.

Модель COSMO развивается и поддерживается Европейским консорциумом по мезомасштабному моделированию. В консорциум входят метеослужбы Германии, Италии, России, Греции, Румынии и других Европейских государств [13, 21].

В Гидрометцентре России модель WRF используется с горизонтальным разрешением от 3 до 20 км [24–28, 45, 46, 54, 57], а также COSMO-Ru с горизонтальным разрешением от 1 до 14 км [13, 31, 68, 101–103]. В качестве начальных данных для мезомасштабных моделей используются выходные данные глобальных моделей.

Совершенствование численных методов прогнозов проводится во многих направлениях.

Исследуются возможности гидродинамических моделей различного пространственного разрешения прогнозировать конвективные явления, и, в частности, сильные осадки. Исследования проводятся как с помощью глобальных моделей [5, 22, 110, 111, 152], так и мезомасштабных [6, 8, 13, 21, 23, 27, 28, 31, 45, 62, 145]. Так в Гидрометцентре России проводятся оперативные испытания численных прогнозов осадков ПО четырем глобальным моделям: ПЛАВ, GFS, ICON, GSM, а также по **ДВVM** мезомасштабным моделям: COSMO-RU (с шагом 7 и 13 км) и WRF [13]. Результаты оценки 12-часовых сумм осадков показывают, что лучше всего с прогнозом осадков справляется модель ICON. Прогнозы модели COSMO-RU с разным шагом немного уступают ей, но опережает другие зарубежные модели. При прогнозе сильных осадков ($\geq 6 \text{ мм}/12 \text{ ч} - \text{снег}$ или $\geq 15 \text{ мм}/12 \text{ ч}$ дождь и смешанные осадки) модели ICON и COSMO-RU (13 км) дают примерно одинаковые результаты. При этом качество прогнозов зимних

осадков выше, чем летних. Что касается прогноза очень сильных осадков (≥ 20 *мм*/12 *ч* – снег или ≥ 50 *мм*/12 *ч* – дождь и смешанные осадки), то ни одна из моделей не смогла их спрогнозировать. В целом качество прогноза по данным моделям авторы считают удовлетворительным для летнего периода и хорошими для зимнего.

Выходные моделей данные используются не только для непосредственного прогноза осадков, но также и для расчета характеристик осадков другими методами. Так результаты моделирования глобальных и мезомасштабных моделей используются для расчета индексов неустойчивости [21, 23, 45, 66, 128].

На основе модельных данных осадки рассчитываются также с помощью физико-статистических методов [5–7, 10, 17, 41, 90–94]. Сущность физикостатистических методов заключается в составлении дискриминантных уравнений с использованием предикторов, от которых зависит образование сильных осадков. Результат решения таких уравнений указывает на возможность или невозможность образования сильных осадков. Предикторы могут рассчитываться как по синоптическим картам, так и по выходным данным моделей. В качестве предикторов могут выступать приземная температура и влажность воздуха, лапласиан давления, скорость восходящих потоков, дефицит точки росы и другие метеорологические величины, и параметры.

В целях повышения качества прогнозов сильных осадков разрабатываются и применяются алгоритмы усвоения дополнительных наблюдений, начальных данных, таких, как данные спутниковых радиолокационные данные, данные лидарных измерений и наземных наблюдений [26, 55, 56, 71, 76, 108, 115, 126, 136, 142, 156]. Результаты исследований показывают, что усвоение спутниковых, радиолокационных и доплеровских измерений улучшает прогноз осадков. В то же время, усвоение дополнительных наземных данных не дает заметного повышения качества прогноза сильных осадков.

Исследуется вопрос о выборе оптимального набора параметризаций физических процессов для разных территорий. При этом считается, что выбор наиболее удачного набора схем позволяет повысить качество прогнозов [21, 27, 28, 62, 69, 77, 78]. В зависимости от географического положения разные параметризации могут работать по-разному. Для территории Пермского края в модели WRF оптимальным набором параметризаций является [21]:

– микрофизика облачности – Схема Томпсона,

– планетарный пограничный слой – Схема университета Yonsei/Схема Меллора-Ямады-Янича,

- подстилающая поверхность - Модель Noah,

– коротковолновая и длинноволновая радиация – Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)/Cxema GFDL,

 приземный слой – схема Монина-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия,

- конвекция – прямое моделирование (без параметризации).

При прогнозе сильных осадков полезной информацией могут быть спутниковые данные [3, 15, 16, 20, 29, 32–37, 53, 54, 61, 62, 98, 157].

Прогноз осадков по данным спутниковых наблюдений сводится к выявлению облачных систем, дающих осадки, прогнозу их эволюции и будущего положения. Для расчета количества осадков можно использовать, например, метод Н.И. Глушковой [84]. Его сущность состоит в том, что все облачные системы разделяются на пять типов. Для расчета количества осадков порядковый номер типа облачной системы умножается на высоту верхней границы облачности и некоторый коэффициент.

Другой подход к определению интенсивности осадков был предложен А.А. Алексеевой и М.В. Бухаровым [20]. Подход основан на эмпирических взаимосвязях между интенсивностью дождя и метеорологическими параметрами, значения которых вычисляются с помощью методов обработки спутниковых данных. В качестве таких метеорологических параметров используются максимальная скорость восходящих потоков, высота верхней

границы облачности, радиационная температура на уровне верхней границы облачности (ВГО), приземная температура воздуха, средний вертикальный градиент температуры в слое от земной поверхности до ВГО, вероятность осадков, водозапас облаков, высота нулевой изотермы в облаках, высота, на которой наблюдается максимальная скорость восходящих потоков в облачности.

С целью диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды в ФГБУ «НИЦ Планета» была разработана технология, которая в автоматическом режиме позволяет восстанавливать характеристики облачного покрова по спутниковым данным, получаемым с различных космических аппаратов [32–36, 72]. В основе технологии лежат методы попиксельного порогового автоматизированного дешифрирования И классификации спутниковой информации по косвенным признакам (комплексная пороговая методика). Исходной спутниковой информацией служат значения альбедо и радиационной температуры, измеренные радиометрами SEVIRI (спутники Meteosat), AVHRR (спутники NOAA) и МСУ-МР (спутник Метеор-М). Также качестве дополнительной В информации привлекаются такие данные, как поля вертикального распределения температуры И влажности воздуха, температуры подстилающей поверхности, атмосферного давления на уровне моря, расчеты радиационных моделей, карты рельефа, типа и отражательных свойств подстилающей поверхности и др.

Процесс дешифрирования и классификации облачных характеристик проходит в несколько этапов, описанных в работе [72]. Выходными продуктами являются:

– результаты определения параметров облачного покрова: облачная маска, типы облачности (13 классов), максимальная и суммарная водность облачного слоя (8–9 градаций), температура ВГО, высота ВГО и нижней границы облачности (4 градации), фазовое состояние воды в слое вблизи ВГО

(4 класса), мгновенная максимальная интенсивность осадков (8–9 градаций), тип осадков у поверхности земли (13 классов);

 – опасные явления: зоны гроз, града и обледенения разной интенсивности (4 класса), высота верхней и нижней границ слоя обледенения каждой интенсивности (9 градаций).

Отнесение каждого определяемого параметра к классу/градации происходит в зависимости от значений ряда предикторов. Например, для определения типа облачности анализируется 15–16 предикторов.

Важным достоинством использования такой технологии является оперативность получения конечных результатов и протяженность территории. Полная обработка одного спутникового срока наблюдения не превышает 1 минуты. Таким образом, на выходе пользователь видит синоптическую ситуацию, существовавшую 6–8 минут назад [34]. Обновление данных возможно через каждые 15 минут. На основе полученных диагностических карт за несколько сроков спутниковых наблюдений строится слайд-шоу, позволяющее дежурному синоптику анализировать динамику развития синоптической ситуации и атмосферных процессов за последние несколько часов и выдавать оперативный краткосрочный локальный и/или региональный прогноз их дальнейшего развития [34].

Кроме краткосрочного прогнозирования важным направлением исследований является развитий технологий наукастинга или текущего прогнозирования. Наукастинг представляет собой детализированный прогноз погоды на ближайшие часы (до 2–6 ч) [42]. Первоначально в наукастинге использовалась обычная экстраполяция во времени радарных и спутниковых изображений. С ростом технических возможностей в технологии текущего прогнозирования стали применятся численные модели, способные к усвоению данных наблюдений высокого разрешения.

Одним из главных инструментов получения исходных данных для наукастинга является доплеровский метеорологический радиолокатор (ДМРЛ). Локатор позволяет получать информацию о распределении

облачности, осадков и других явлений в радиусе до 250 *км* с периодичностью от 6 до 12 минут. Карты погоды являются результатом вторичной обработки информации об отражаемости с помощью специальных алгоритмов, в которых заложены критерии, характерные для разных видов явлений.

Можно выделить три основных направления, в которых ведутся разработки методов и алгоритмов, используемых в целях наукастинга:

 идентификация мезомасштабных конвективных комплексов (МКК), с которыми связаны опасные явления погоды, и в частности, сильные ливни;

их отслеживание для определения скорости и направления перемещения;

 непосредственный прогноз будущего положения МКК и количества сильных осадков.

В каждом из этих направлений можно выделить несколько подходов и методов.

На этапе идентификации применяются критериальный подход (с использование как одного порогового значения, так и нескольких) [48, 60, 122–124, 131, 139, 146, 148], алгоритм построения 3D структуры МКК [123, 133, 150], а также алгоритмы, позволяющие отфильтровать на изображениях помехи разного характера [147, 150]. Наиболее простой способ – это применение критериального метода. Его суть заключается в том, что при обработке изображения выделяются области, которые превышают заданный критерий. Эти области соответственно принимаются за конвективный объект. В разных алгоритмах обработки используются разные критерии. Кроме отражаемости в некоторых случаях используют площадной критерий. За МКК принимается та группа пикселей, которая превышает определённую площадь.

Критериальный подход используется не только для выявления МКК, но и, например, для разделения осадков на конвективные и обложные. В [139] было установлено, что конвективные осадки наблюдаются при значении отражаемости более 43 *dBZ*. Также он применяется для разделения градовых и не градовых облаков [148].

Построение 3D структуры МКК используется для более точного определения центров конвективных объектов. Это связано с тем, что, используя пороговые значения отражаемости, можно идентифицировать лишь большие конвективные системы. Однако их может быть недостаточно, чтобы выделить высокоинтенсивные системы более мелкого масштаба. Суть этого алгоритма состоит в том, что на всех уровнях сканирования применяется 7 пороговых значений (60, 55, 50, 45, 40, 35 и 30 *dBZ*), что позволяет определить размеры конвективной структуры, а не только выделить ее центр. Далее эти изображения накладываются друг на друга с поиском перекрытий.

Кроме определения конвективных объектов, актуальной является задача отделения метеорологических полей радиоэха от помех, вызванных не метеорологическими факторами. Эти помехи могут быть связаны с объектами, расположенными на земной поверхности, с биологическим «загрязнением» (скопление летающих насекомых В воздухе) И c аномальным распространением сигнала локатора вблизи поверхности земли [147, 150]. Для решения этой проблемы применяются алгоритмы, которые основаны на искусственной нейронной сети, обученной на миллионном наборе данных ДМРЛ. Данный алгоритм позволяет удалить все помехи изображения, оставив только метеорологическое радиоэхо.

В течение своего жизненного цикла конвективные системы могут распадаться на несколько других, или наоборот, объединяться. Кроме того, могут образовываться новые ячейки. В связи с этим иногда бывает трудно соотнести конвективные системы на новом изображении с аналогичными на предыдущем. Поэтому ведется разработка систем и алгоритмов, которые в автоматизированном режиме способны от срока к сроку отслеживать обнаруженные МКК. Для отслеживания МКК применяются методы взаимной корреляции [154, 155] и перекрытий [1, 129, 131].

Суть метода взаимной корреляции состоит в расчёте коэффициентов корреляция между блоками, содержащими определенное количество пикселей двух последовательных изображений. На предыдущем снимке выбирается

такой блок, который позволяет получить наибольший коэффициент корреляции с блоком на текущем изображении. Данный метод хорошо применим для определения полей конвективных и обложных осадков.

Для отслеживания отдельных конвективных систем применяется метод перекрытий. Принцип данного алгоритма заключается в поиске перекрытия между ячейкой, обнаруженной в момент времени t, и ячейкой, обнаруженной на следующем изображении в момент времени $t + \Delta t$.

Последним этапом в наукастинге является непосредственный прогноз положения конвективных систем и условий погоды.

Наиболее простой вариант такого прогноза представляет собой экстраполяцию обнаруженных конвективных систем на основе скорости и направления их передвижения, вычисленных на основе предшествующих изображений [127, 131, 141].

Другим подходом к текущему прогнозированию погоды является использование численных моделей [26, 55, 56, 82, 137, 147, 149, 151]. В этом случае в качестве начальных полей используется информация от ДМРЛ, имеющая высокое разрешение.

Для непосредственного прогноза интенсивности выпадения осадков используются методы, основанные на зависимости интенсивности осадков от радиолокационной отражаемости и от высоты радиоэха [5, 9, 39, 40, 43]. Далее на основе полученной интенсивности и скорости перемещения радиоэха можно вычислить суммы осадков за необходимый период.

2. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА

2.1. Краткое физико-географическое описание Пермского края

Территория Пермского края располагается в глубине материка Евразия и протягивается с восточной окраины Русской равнины до западного склона Уральских гор, на стыке двух частей света — Европы и Азии. Максимальная протяженность с севера на юг составляет 645 *км*, с запада на восток — почти 420 *км*. Самая северная точка края имеет координаты 61°39' с.ш., крайняя южная точка – 56°06' с.ш. Западная и восточная точки находятся соответственно под 51°47' и 59°39' в.д. [85, 86, 95].

Протяженность границ Пермского края составляет около 2,2 тыс. *км*. Площадь края составляет — 160,6 тыс. *км*². Регион граничит на севере с Республикой Коми, на востоке со Свердловской областью, на юге с Республикой Башкортостан, на западе с Удмуртской Республикой, на северозападе с Кировской областью.

Рельеф края разнообразный и распределен неравномерно. Строение рельефа и его характерные черты определяются расположением региона на территории России. Преобладающим рельефом Пермского края является равнина, которая составляет 80% от всей его площади и имеет высоту 200–400 *м* над уровнем моря.

По мере углубления от западной границы Пермского края в восточном направлении происходит постепенная трансформация платформы в краевой предгорный прогиб, представляющий собой, как и платформенная часть Предуралья, обширные низменности, соседствующие с не менее крупными возвышенностями. В восточной границе прогиба (западная граница Урала) происходят изменения геологического строения — относительно горизонтальные и сравнительно пологие слои осадочных горных пород сменяются на крупные и крутые линейные складки. В части Русской равнины,

в которой находится Пермский край, можно выделить несколько возвышенностей: Северные Увалы (северо-запад края), Верхнекамская возвышенность (на крайнем западе), Оханская возвышенность (в центральной части), Тулвинская возвышенность (на юге) и Уфимское плато (на крайнем юго-востоке). Тулвинская возвышенность обладает максимальной высотой среди всех перечисленных, а ее высшая точка – гора Белая – имеет высоту 446 *м* над уровнем моря. Самая низкая точка рельефа отмечена на крайнем юго-западе края в урезе реки Камы и составляет 66 *м* над уровнем моря [73].

Горная часть, на которую приходится примерно 20% общей площади Пермского края, относится к западному склону Урала. Отдельные фрагменты его центральных осевых хребтов находятся на крайнем северо-востоке региона. Здесь уже высоты возвышенностей (гряд и холмогорий) могут меняться с 300–400 *м* до 600–800 *м* и более. Через территорию Пермского края проходит граница между Северным и Средним Уралом, которая располагается у подножья горы Ослянка (1119 *м*).

Средней Урал проходит между 59°15' и 55°54' с.ш., является низкогорной областью со средними высотами 600–800 *м* и отличается грядово-увалистым сглаженным рельефом. Северный Урал является среднегорной областью, на котором наблюдаются преобладающие высоты 800–1400 *м* и состоит из нескольких параллельных горных хребтов общей шириной 50–60 *км*.

2.2. Пространственно-временное распределение сильных осадков теплого периода

В настоящее время довольно много исследований посвящено разработке новых и усовершенствованию уже существующих методов прогноза сильных осадков, которые описаны в главе 1. Однако практически для всех методов существует проблема большого количества ложных тревог, которая обусловлена локальностью изучаемого явления.

Для более качественного прогнозирования, в частности, для правильной интерпретации результатов моделирования, необходимо знать региональные особенности территории, для которой разрабатывается прогноз погоды, так как такие особенности могут внести значительные изменения в развитие тех или иных процессов. Таким образом, информация о пространственновременном распределении осадков в градации ОЯ на изучаемой территории является актуальной.

Исследование особенностей пространственно-временного распределения сильных осадков теплого периода проведено на основе информации о датах, когда наблюдалось опасное явление (жидкие осадки в градации ОЯ) в период с мая по сентябрь 1979–2021 гг., которая содержится в метеорологических ежемесячниках [81], журналах штормовых сообщений WAREP, а также базе данных опасных явлений Пермского края [14, 117]. Также о наступлении ОЯ можно судить по данным о количестве выпавших осадков из открытых источников срочной метеорологической информации [96, 97]. Для анализа пространственного распределения числа случаев с ОЯ по территории Пермского края была построена карта с использованием программы ArcGis 10.2.1 на основе интерполяции по методу обратно взвешенных расстояний (OBP).

Всего за период 1979–2021 гг. метеостанциями Пермского края был зарегистрирован 161 случай наступлении ОЯ: 15 случаев с сильным ливнем и 146 случаев с очень сильным дождем. За один случай принималось выпадение сильного дождя (в дальнейшем под термином «сильный дождь» с целью обобщения будем понимать, как очень сильный дождь, так и сильный ливень) продолжительностью менее 12 ч, который достиг критерия опасного явления на одной станции (т.е. если в один день ОЯ было зафиксировано, например, на двух станциях, то это принималось за два случая). Всего, за исследуемый период, опасные явления в данной категории были зафиксированы на двух станциях 16 раз. Следует отметить, что часто сильные дожди наблюдались более чем на двух станциях, однако они не достигали критериев ОЯ.

Самые ранние случаи сильных дождей были зафиксированы в мае, а самые поздние в сентябре. Основная доля зарегистрированных опасных явлений приходится на летние месяцы.



На рис. 2.1 представлено распределение числа случаев сильных дождей по годам.

Рис. 2.1. Распределение сильных дождей по годам за 1979-2021 гг.

Как следует из графика, наибольшая повторяемость сильных дождей наблюдалась в 2007 и 2021 г. и составила 9 случаев. В 1983 и 2006 гг. осадки, достигшие критериев ОЯ, отсутствовали.

Для того чтобы выявить общую тенденцию и особенности распределения случаев ОЯ, была проведена процедура сглаживания исходного ряда, представленного на рис. 2.1. Сглаживание проводилось методом скользящего среднего с периодом осреднения 5 лет. На основе получившегося графика были также построены линейный и полиномиальный тренды (рис. 2.2).

Как следует из рис. 2.2, в период с 1979 по 2021 гг. наблюдается плавное увеличение повторяемости случаев с осадками в градации ОЯ. Оценка значимости уравнения регрессии проводилась с помощью F-критерия Фишера [74]. Сравнение фактического значения (F = 27,89) с табличным (F = 4,11 при уровне значимости $\alpha = 0,05$) показало, что уравнение имеет статистическую

значимость. Средняя ошибка аппроксимации при этом составила 26,1%, что в рамках данной задачи можно считать удовлетворительным результатом.



Рис. 2.2. Распределение сильных дождей по годам за 1979-2021 гг.

Построение на графике линии тренда в виде полиномиальной функции пятой степени позволяет увидеть некоторую периодичность в распределении сильных дождей в исследуемом временном отрезке (рис. 2.2). Можно выделить два периода с наибольшей повторяемостью сильных дождей. Первый с конца 80-х годов XX века по 2003 г. Второй период начинается в 2012 г. и продолжается на данный момент. Как видно первый период имеет большую продолжительность, чем второй. Между этими двумя периодами повторяемость сильных дождей находится на низком уровне, за исключением 2004 и 2007 года, когда наблюдалось аномально высокое число случаев.

Для полученного уравнения регрессии также была проведена оценка значимости. Фактическое значение F-критерия Фишера составило 259,96, что во много раз превышает табличное значение (F = 4,11 при уровне значимости $\alpha = 0,05$). Это свидетельствует о статистической значимости полученного уравнения. Средняя ошибка аппроксимации составила 12,4%.

Если рассматривать внутригодовое распределение случаев с сильными дождями, то можно увидеть, что подавляющее большинство случаев ОЯ

наблюдалось в июле и июне и составило 48% и 30% соответственно. В августе было зарегистрировано 19% сильных дождей, а в мае и сентябре лишь 1 и 2% соответственно (прил. 1).

Согласно [87] осадки на метеостанциях измеряются два раза в сутки в сроки 3 и 15 ч всемирного согласованного времени (ВСВ), поэтому осадки можно разделить на ночные и дневные. В 57% случаев сильные дожди наблюдались в дневное время, остальные 43% — в ночное.

Такое распределение сильных дождей по месяцам и в течение суток согласуется с результатами проведенного нами исследования, посвященного ливневым осадкам теплого периода на территории Пермского края [59]. При этом были рассмотрены ливневые осадки теплого периода разной интенсивности и продолжительности, информация о которых была получена по данным плювиографов, установленных на шести метеостанциях Пермского края: Вая, Чердынь, Бисер, Пермь, Кын и Кунгур. Всего за период с мая по сентябрь 2011–2019 гг. на этих метеостанциях было зафиксировано 668 случаев с ливневыми осадками. Анализ показал, что основная доля случаев с ливнями приходится на июнь и июль. При этом чаще всего ливневые дожди формируются в дневное время.

Распределение случаев с сильными дождями по территории Пермского края имеет некоторые особенности, связанные с географическим положением и рельефом [107]. Западная часть Пермского края (80% территории) расположена на окраине Восточно-Европейской равнины, где преобладает низменный и равнинный рельеф. На востоке расположились Уральские горы, занимающие 20% территории края. Их высота в Пермском крае изменяется от 600 до 1500 *м* (рис. 2.3*а*).

Всего в Пермском крае действует 25 метеорологических станций. В течение 1979–2021 гг. сильные осадки, достигшие критериев опасного явления, были зарегистрированы на 22 станциях. На метеостанциях Кудымкар, Оса и Чермоз, исследуемое опасное явление не наблюдалось.



Рис. 2.3. Физическая карта Пермского края (*a*); пространственное распределение случаев ОЯ в виде очень сильных дождей и сильных ливней по территории Пермского края (*б*).

На рис. 2.36 представлено распределение суммарного числа случаев с ОЯ в виде очень сильных дождей и сильных ливней по территории Пермского выраженный меридиональный края, которое носит ярко характер. Повторяемость числа случаев возрастает в направлении с запада на восток. Такое распределение можно объяснить тем, что согласно [90] в Пермском крае в ливнеопасных районах располагаются 5 из 25 метеостанций: Вая, Губаха, Бисер, Кунгур и Кын. Как было отмечено во введении, для таких метеостанций критерий опасного явления в виде очень сильного дождя снижается с 50 мм/12 *ч* до 30 *мм*/12 *ч*. Таким образом, здесь сильные дожди чаще достигают опасных значений.

С другой стороны, несмотря на относительно небольшую высоту Уральских гор, они способны оказывать значительное влияние на перемещение циклонов и их фронтальных разделов, задерживая их над территорией Пермского края. Кроме того, горы усиливают упорядоченные вертикальные движения, что способствует более интенсивному осадкообразованию.

Интересно также отметить тот факт, что из 16 случаев, когда сильные дожди наблюдались на двух метеостанциях, в 6 случаях это были метеостанции Кын и Кунгур и в 3 случаях Кын и Бисер.

2.3. Особенности синоптических условий при выпадении сильных дождей в Пермском крае

В подавляющем большинстве случаев (88%) выпадение дождей в категории опасного явления (очень сильного дождя и сильного ливня) на территории Пермского края связано с циклонической деятельностью атмосферы. Однако не все циклоны приводят к таким ОЯ. Поэтому важной задачей является выявление характеристик циклонов, при которых с большей долей вероятности могут наблюдаться сильные дожди.

B параграфе были исследованы синоптические данном условия возникновения сильных дождей на территории Пермского края в период 1979-2020 гг. В ходе работы рассчитывалась повторяемость траекторий смещения перемещения, циклонов, скорости ИХ глубины, стадии развития И вертикальной протяженности. Также дополнительно определялись ориентировочные значения площади и диаметра циклонов.

Синоптическая ситуация и указанные выше характеристики циклонов определялись с использованием данных реанализа по модели CFS с шагом по времени 6 ч и размером пространственной сетки $0,5 \times 0,5^{\circ}$. На основе данных реанализа были построены карты приземного давлении, а также карты относительной топографии для изобарических поверхностей 850, 700, 500 и 300 гПа. Для определения района возникновения циклонов использовались карты, построенные за 12–36 ч до выпадения сильных осадков.
В ходе статистической обработки полученных данных [59] была рассчитана повторяемость синоптических ситуаций и характеристик циклонов.

Всего за период с мая по сентябрь 1979–2021 гг. метеостанциями Пермского края был зарегистрирован 161 случай наступлении ОЯ в виде очень сильных дождей и сильных ливней. Однако, как указывалось в предыдущем параграфе, 16 раз сильные дожди наблюдались на двух метеостанциях и были связаны с одними и теми же синоптическими условиями. Поэтому для того, чтобы одна и та же синоптическая ситуация не учитывалась дважды, одновременное выпадение сильных дождей на нескольких станциях принималось за один случай. Таким образом, в ходе исследования было рассмотрено 145 случаев с ОЯ.

Анализ карт приземных полей давления показал, что в 88% случаев формирование и выпадение сильных дождей связано с влиянием циклонов и их фронтальных систем. В 12% случаев сильные дожди являются внутримассовыми, которые связаны с влиянием западной либо северной периферии антициклонов, а также малоградиентных полей давления.

По району возникновения циклоны были разделены на четыре типа: южные (южные и юго-западные циклоны), западные (западные и северозападные циклоны), северные и местные. В рамках данного исследования южными называются циклоны, возникшие в районе Каспийского и Черного морей и над Северным Казахстаном. Западные циклоны формируются над Северной Европой, Норвежским либо Белым морем, северные – над Баренцевым морем и в районе архипелага Новая Земля. Последние два типа циклонов часто впоследствии становятся ныряющими. Местным циклоном называется циклон, возникший непосредственно над территорией Пермского края или сопредельных регионов. Следует отметить, что в данном случае формирование местные циклонов связано с волновыми возмущениями на малоподвижных фронтах, а не с термическим фактором.

Распределение числа случаев сильных дождей (напомним, что под этим термином здесь понимается очень сильный дождь и сильный ливень) в зависимости от района возникновения циклонов представлено на рис. 2.4, из которого следует, что наиболее часто сильные дожди наблюдаются при смещении на территорию Пермского края южных циклонов, на долю которых приходится 46,6% от общего числа случаев сильных осадков, связанных с циклонической деятельностью. Западные циклоны оказывают меньшее влияние на формирование сильных дождей (31%). Наименьшее число случаев сильных дождей зафиксировано при смещении на Пермский края северных циклонов – лишь 6%. Несмотря на то, что в Пермском крае преобладает зональный перенос воздушных масс, сильные дожди чаще наблюдаются именно при южных циклонах, а не западных. Это свидетельствует о том, что для южных циклонов характерны более высокие контрасты температуры и образование обильного количества осадков.



Рис. 2.4. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от области возникновения циклонов.

Другой характеристикой циклонов является скорость их перемещения. Скорость перемещения циклонов, при которых наблюдались сильные дожди, изменялась от 3 до 55 *км/ч*. Среднее значение составило 19 *км/ч*. Распределение числа случаев сильных дождей в зависимости от скорости перемещения циклонов представлено на рис. 2.5. Наибольшее число случаев сильных дождей связано со стационарными и малоподвижными циклонами, доля которых составляет 28%. Стационарным называется циклон, скорость движения которого не превышает 5 *км/ч*. Скорость движения малоподвижного циклона составляет от 5 до 10 *км/ч*.

Высокая повторяемость сильных дождей при стационарных и малоподвижных циклонах, по сравнению с другими градациями скорости, обусловлена низкой скоростью перемещения таких циклонов. Они долго располагаются над одной и той же территорией, что способствует выпадению большего количества осадков за исследуемый промежуток времени.



Рис. 2.5. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от скорости перемещения циклонов.

Далее для каждого случая с ОЯ была определена глубина циклона, с которым это ОЯ связано. Среднее значение глубины циклонов, при которых наблюдаются сильные дожди, составило 998,2 *гПа*. Минимальное и максимальное значения соответственно равны 980,0 и 1014,0 *гПа*. На рис. 2.6 представлено распределение числа случаев сильных дождей в зависимости от глубины циклона, из которого следует, что чаще всего сильные дожди связаны с циклонами, у которых давление в центре равняется или близко среднему.

Для оперативной практики особенно ценной является информация о преобладающих стадиях развития циклонов, при которых наблюдаются сильные дожди. На рис. 2.7 показано распределение числа случаев сильных дождей в зависимости от стадий развития циклонов.



Рис. 2.6. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от глубины циклонов (гПа).

Наибольшее число случаев сильных дождей наблюдается в циклонах, находящихся на стадии заполнения (45%). Практически одинаковое количество случаев сильных дожей приходится на молодые циклоны и циклоны в стадии максимального развития. Их доля составляет 24 и 28% соответственно. Наименьший вклад вносят циклоны на стадии возникновения – с ними связано лишь 3% случаев сильных дождей. Такое распределение объясняется тем, что на стадии заполнения циклоны, как правило, становятся малоподвижными, что приводит к выпадению обильного количества осадков над одной территорией.

Дополнительно был исследован вопрос о развитии циклонов по вертикали. Для этого были выбраны стандартные изобарические поверхности 300, 500 и 700 гПа, которым соответствует примерная высота 9, 5,5 и 3 км. Зависимость числа случаев сильных дождей от максимальной высоты, до которой прослеживается циклон, представлена на рис. 2.8.



Рис. 2.7. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от стадии развития циклонов.



Рис. 2.8. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от развития циклонов по вертикали.

Как следует из рис. 2.8, более половины случаев сильных дождей (57%) связаны с хорошо развитыми по вертикали циклонами, которые прослеживаются до изобарической поверхности 300 гПа и более. С циклонами, которые прослеживаются до слоев 700–500 и 500–300 гПа, связано 28 и 9% случаев сильных дождей соответственно. На долю низких циклонов, высота которых не превышает 700 гПа, приходится лишь 6% случаев.

С целью изучения геометрических характеристик циклонов, с которыми связаны сильные дожди, для каждого случая определялись диаметр и площадь циклона. Указанные характеристики были определены по последней замкнутой изобаре. Однако эти значения следует считать ориентировочными, так как измерение данных параметров бывает довольно затруднительно ввиду отличия формы циклонов от окружности.



Рис. 2.9. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от диаметра циклонов (км).



Рис. 2.10. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от площади циклонов (*км*).

На рис. 2.9 и 2.10 показаны распределения числа случаев сильных дождей в зависимости от диаметра и площади циклонов. Диаметр циклонов, при которых наблюдались сильные дожди, изменялся от 200 до 2275 *км*. Среднее значение составило 945 км. Три четверти случаев сильных дождей приходятся на циклоны, диаметр которых не превышает 1200 км.

Площадь циклонов изменялась от 70650 до 4062866 км². Среднее значение составило 838200 км².

Как видно из рис. 2.9, большинство случаев с сильными осадками связано со сравнительно небольшими по площади циклонами.

Таковы основные результаты комплексного статистического анализа данных о характеристиках циклонов, с которыми были связаны сильные дожди в Пермском крае.

2.4. Особенности полей вертикальных движений над Пермским краем в период выпадения сильных осадков теплого периода

В главе 1 было отмечено, что в образовании осадков принимают участие два основных процесса: конденсация водяного пара на начальном этапе и дальнейшее укрупнение облачных элементов за счет коагуляции. При этом важную роль в образовании осадков играют вертикальные движения. Вопервых, восходящие движения обеспечивают понижение температуры воздуха, благодаря которому в атмосфере наблюдается перенасыщение водяного пара и рост капель за счет конденсации. Во-вторых, капли, поднимаемые восходящими потоками в более высокие слои атмосферы, при падении проходят значительную толщу облака, благодаря чему увеличиваются в размерах за счет коагуляции. Чем интенсивнее восходящие потоки, тем выше смогут подняться облачные элементы.

Данная часть работы посвящена исследованию вертикальных движений при выпадении сильных осадков, достигших критериев опасного явления: очень сильный дождь и сильный ливень.

Материалами для исследования послужили информация о датах, когда наблюдалось опасное явление в период с 1979 по 2021 г., данные реанализа

модели CFS (Climate Forecasting System) в сроки 0, 6, 12 и 18 ч ВСВ и архив синоптических карт в программном комплексе ГИС Метео [104, 105].

С целью изучения зависимости скорости вертикальных движений от синоптической ситуации и стадии развития циклона для каждого случая с осадками в градации ОЯ определялся тип фронтальной системы и стадия развития циклона, с которой они были связаны. Методика определения была подробно изложена выше в п. 2.3 настоящей работы.

Из данных реанализа также были получены значения скорости вертикальных движений на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 $e\Pi a$, которые уже были посчитаны моделью. В файлах реанализа скорость вертикальных движений соответствует параметру Vertical velocity (pressure) (VVEL) и имеет единицы измерения $\Pi a/c$. Восходящие движения имеют отрицательные значения, а нисходящие – положительные. С помощью программы OpenGrADS поля вертикальных движений были сохранены в растровом формате GeoTIFF, который, кроме информации о скорости в каждом узле, также содержит метаданные об их географической привязке, что позволяет проводить пространственный анализ в таких геоинформационных системах как ArcGIS и QGIS. Для каждого случая с сильными осадками были получены значения скорости вертикальных движений в сроки 0, 6, 12 и 18 ч BCB.

Как известно, сильные осадки (особенно ливневые), как правило, носят локальный характер, поэтому имеет смысл определять скорость вертикальных движений не только в конкретной точке (метеостанции, где было зафиксировано явление), но и в некотором радиусе от нее [22, 64]. Это позволяет избежать занижения интенсивности вертикальных движений в случаях пространственной ошибки. Поэтому в данном исследовании выбирались максимальные по модулю значения скорости в радиусе 50 км от метеостанции, на которой было зафиксировано ОЯ. С этой целью в программе QGIS для каждой метеостанции были построены буферные зоны с указанным

радиусом, в пределах которых определялись значения скорости вертикальных движений.

За исследуемый период 1979–2021 гг. на метеостанциях Пермского края сильные осадки, как уже было отмечено ранее, были зарегистрированы 161 раз.

Средняя скорость вертикальных движений без учета синоптической ситуации и эволюции циклонов составила –0,440 *Па/с* на изобарической поверхности 850 гПа, –0,538 *Па/с* на изобарической поверхности 700 гПа и –0,525 *Па/с* на изобарической поверхности 500 гПа. Таким образом, максимальные скорости вертикальных движений формируются вблизи изобарической поверхности 700 гПа.

Таблица 2.1

	Статист	гическая хара	ктеристика,	Па/с
Синоптическая ситуация	Максимум	Минимум	Среднее	Медиана
	850 гПа			
Холодный фронт	-0,059	-1,439	-0,435	-0,367
Теплый фронт	-0,150	-1,176	-0,461	-0,445
Фронт окклюзии	-0,135	-1,077	-0,502	-0,458
Волновое возмущение на				
малоподвижном фронте	-0,252	-0,717	-0,518	-0,492
Внутримассовые процессы	-0,048	-0,335	-0,195	-0,180
	700 гПа			
Холодный фронт	-0,006	-1,310	-0,487	-0,396
Теплый фронт	-0,148	-1,668	-0,541	-0,541
Фронт окклюзии	-0,131	-1,472	-0,654	-0,615
Волновое возмущение на				
малоподвижном фронте	-0,156	-1,238	-0,662	-0,718
Внутримассовые процессы	-0,040	-0,387	-0,203	-0,225
	500 гПа			
Холодный фронт	-0,060	-0,941	-0,474	-0,433
Теплый фронт	0,007	-1,528	-0,551	-0,422
Фронт окклюзии	-0,060	-1,885	-0,674	-0,668
Волновое возмущение на				
малоподвижном фронте	-0,259	-0,954	-0,616	-0,656
Внутримассовые процессы	0,004	-0,486	-0,183	-0,164

Статистические характеристики скорости вертикальных движений (*Па/с*) при выпадении сильных дождей в зависимости от синоптической ситуации

В зависимости от синоптической ситуации, при которой сформировались сильные дожди (также, как и ранее (см. параграфы 2.2 и 2.3) для обобщения

имеющихся случаев под термином «сильные дожди» будем понимать очень сильные дожди и сильные ливни), поля вертикальных движений имеют разный характер распределения скорости (табл. 2.1).

Как следует из табл. 2.1, значительная разница в скорости вертикальных движений наблюдается между фронтальными осадками и осадками, связанными с внутримассовыми процессами. Так, скорость восходящих движений при осадках, образованных на атмосферных фронтах в среднем составила –0,479 Па/с на изобарической поверхности 850 гПа, –0,586 Па/с на изобарической поверхности 700 гПа и -0,579 Па/с на изобарической поверхности 500 гПа. При этом скорость восходящих движений при внутримассовых осадках оказалась в 2–3 раза ниже. Такая большая разница, по-видимому, связана с тем, что восходящие потоки на фронтальных разделах упорядоченных вертикальных движений, складываются ИЗ a также термической и вынужденной (на холодных фронтах второго рода) конвекции, в то время как вертикальные движения при внутримассовых процессах формируются за счет лишь термической конвекции.

Если сравнивать скорость вертикальных движений на разных фронтах, то можно увидеть, что средние значения отличаются друг от друга не кардинально. Но даже и в этом случае можно выделить некоторые особенности, которые хорошо видно на графиках распределения значений скорости вертикальных движений (рис. 2.11). Например, в целом более высокая скорость всходящих движений в нижней части тропосферы ($850 \ rac{\Pi a}$) наблюдается при волновых возмущениях на малоподвижных фронтах. При этом максимальные значения скорости восходящих потоков наблюдаются на холодных фронтах. В средней тропосфере ($500 \ rac{\Pi a}$) наибольшие значения скорости достигаются на фронтах окклюзии. Вероятно, это связано с тем, что в нижней тропосфере вертикальные движения на холодных фронтах сокронтах соколодных фронтах окклюзии. Вероятно, это связано с тем, что в нижней тропосфере вертикальные движения на холодных фронтах сокоронтах соколодных вынужденной конвекцией, интенсивность которой уменьшается с высотой. В то же время, в процессе окклюдирования, когда один фронта

поднимается по поверхности другого, уровень с интенсивными восходящими движениями, смещается в сторону средней тропосферы.



Рис. 2.11. Распределение значений скорости вертикальных движений (*Па/с*) при выпадении сильных осадков на разных изобарических поверхностях в зависимости от синоптической ситуации.

Если скорость восходящих движений на атмосферных фронтах в среднем отличается мало, то на разных стадиях эволюции циклонов, с которыми связаны сильные дожди, наблюдаются более заметные различия. Как следует из табл. 2.2, в целом наиболее высокая скорость вертикальных движений наблюдается тогда, когда циклон находится в стадии молодого барического образования. Средняя скорость на изобарической поверхности 850 *гПа* составила –0,564 *Па/с*, на изобарической поверхности 700 *гПа* –0,695 *Па/с* и на изобарической поверхности 500 *гПа* –0,630 *Па/с*. Наименьшие значения скорость вертикальных движений наблюдаются при сильных дождях, связанных с циклонами в стадии их заполнения. Однако в отдельных случаях скорость восходящих потоков может быть даже выше, чем при других стадиях развития циклона.

Таблица 2.2

	Статистическая характеристика, Па/с							
Стадия развития циклона	Максимум	Минимум	Среднее	Медиана				
	850 гПа							
Стадия волны	-0,252	-0,562	-0,434	-0,462				
Молодой циклон	-0,132	-1,439	-0,564	-0,492				
Максимальное развитие	-0,150	-0,945	-0,442	-0,451				
Заполнение	-0,059	-1,176	-0,441	-0,369				
700 гПа								
Стадия волны	-0,430	-0,733	-0,650	-0,718				
Молодой циклон	-0,112	-1,472	-0,695	-0,682				
Максимальное развитие	-0,008	-1,460	-0,568	-0,541				
Заполнение	-0,006	-1,668	-0,520	-0,443				
500 гПа								
Стадия волны	-0,403	-0,954	-0,696	-0,713				
Молодой циклон	-0,128	-1,885	-0,630	-0,668				
Максимальное развитие	-0,078	-1,383	-0,589	-0,575				
Заполнение	0,007	-1,629	-0,544	-0,455				

Статистические характеристики скорости вертикальных движений (*Па/с*) при выпадении сильных осадков в зависимости от эволюции циклона

В зависимости от физических условий образований, осадки принято делить на обложные, ливневые и осадки смешанного типа (когда наблюдается одновременное выпадение ливневых и обложных осадков). При этом для каждого типа осадков скорость вертикальных движений имеет различные значения.

В рамках данного исследования характер выпадающих осадков определялся по данным метеостанций. Эти данные содержат, в частности, информацию о явлениях, времени их начала и окончания, а также их интенсивности. Ливневые и обложные осадки кодируются цифрами 64 и 63 соответственно. Однако у этой информации есть доля субъективизма, так как визуально бывает трудно различить ливневой и обложной дождь. Такое может случиться, например, при маскировке конвективной облачности слоистообразной. Поэтому данную информацию об осадках необходимо анализировать более тщательно. Например, в случае, когда наблюдатель на протяжении 12 ч кодирует ливневой дождь постоянной интенсивности, что не характерно для данного типа осадков. Или, наоборот, закодированный обложной дождь часто меняет интенсивность от слабой до сильной и в целом имеет небольшую продолжительность. В таких ситуациях, в рамках данных исследований считалось, что наблюдались осадки смешанного характера.

Таблица 2.3

Тип осолисов	Статистическая характеристика, Па/с					
тип осадков	Максимум	Минимум	Среднее	Медиана		
	850 гПа					
Ливневые	-0,048	-0,900	-0,343	-0,314		
Обложные	-0,299	-0,945	-0,611	-0,571		
Смешанные	-0,059	-1,176	-0,564	-0,487		
700 гПа						
Ливневые	-0,008	-1,460	-0,403	-0,301		
Обложные	-0,327	-0,975	-0,675	-0,631		
Смешанные	-0,006	-1,668	-0,751	-0,732		
		500 гПа				
Ливневые	0,004	-1,360	-0,372	-0,259		
Обложные	-0,080	-0,972	-0,668	-0,809		
Смешанные	-0,071	-1,885	-0,854	-0,818		

Статистические характеристики скорости вертикальных движений (*Па/с*) при выпадении сильных осадков в зависимости от физических условий их образования

Ввиду наличия ограниченного количества данных, тип осадков определялся только для случаев, которые были зафиксированы в период с 1997 по 2020 г. Всего за указанный период было зарегистрировано 99 случаев, когда наблюдались сильные осадки, достигшие критерия опасного явления. В табл.

2.3 представлены некоторые статистические характеристики скорости вертикальных движений в зависимости от физических условий образования выпадающих осадков.

Из табл. 2.3 следует, что наименьшая скорость восходящих вертикальных движений на всех изобарических поверхностях наблюдается при выпадении ливневых осадков. Скорость восходящих вертикальных потоков при обложных и смешанных осадках оказывается в 1,5–2 раза выше, чем при ливневых. Такое распределение скорости вертикальных движений можно объяснить следующим образом. Как известно, ливневые осадки связаны с кучево-дождевой облачностью, которую можно отнести к масштабу мезо- γ с горизонтальными размерами менее 50 *км* [30]. В то же время, реанализ CFS имеет шаг сетки 0,5°, что соответствует приблизительно 55 *км*. В результате, кучево-дождевая облачность как бы «проваливается» внутрь сетки и, как следствие, реанализ не позволяет определить скорость вертикальных движений в отдельных кучево-дождевых облаках.

По указанным выше данным метеостанций была также рассчитана продолжительность выпадения дождя для каждого случая с сильными осадками. Для выявления зависимости между скоростью вертикальных движений и продолжительностью выпадения осадков были рассчитаны коэффициенты корреляции на разных изобарических поверхностях. Расчет коэффициентов проводился двумя способами. В первом варианте учитывались все 96 случаев с сильными осадками. Однако, как было показано выше, реанализ не позволяет определить скорость вертикальных движений в отдельных кучево-дождевых облаках, поэтому для более точного выявления зависимости, логично было бы исключить ливневые осадки из общей выборки. Таким образом, во втором варианте коэффициенты корреляции были посчитаны по выборке, которая содержит случаи ОЯ, связанные с выпадение только обложных осадков и осадков смешанного характера. Оценка полученных коэффициентов корреляции на значимость проводилась с помощью вычисления доверительных интервалов [49]. Результаты расчетов

представлены в табл. 2.4 (жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции).

Способ расчета коэффициента	Изобарическая поверхность, гПа			
корреляции	850	700	500	
С учетом ливневых осадков	-0,55	-0,52	-0,58	
Без учета ливневых осадков	-0,31	-0,14	-0,10	

Значения коэффициента корреляции на разных изобарических поверхностях

Таблица 2.4

Как следует из табл. 2.4, чем больше скорость восходящих потоков, тем продолжительнее наблюдаются осадки. При этом, наблюдается довольно интересное распределение коэффициента корреляции с высотой. При расчете коэффициента с учетом всех типов осадков, он мало изменяется с высотой. Если же корреляция посчитана только для обложных осадков и осадков смешного типа, то ее значения резко уменьшаются с высотой. Такое распределение может быть связано с толщиной облаков, из которых выпадают осадки. Как известно, обложные дожди связаны со слоисто-дождевой облачностью, толщина которой обычно меньше кучево-дождевой. При этом над слоисто-дождевой облачностью располагается высокослоистая облачность, из которой в летнее время осадки не выпадают. Поэтому, несмотря на то что скорость вертикальных движений на изобарической поверхности 500 гПа еще значительна, восходящие потоки способствуют образованию только облачности среднего яруса, которая не дает осадков. Таким образом при оценке продолжительности выпадения обложных осадков наиболее информативной является скорость вертикальных движений в нижней тропосфере.

С практической точки зрения необходимо знать, зависит ли скорость восходящих движений от температурных условий месяца. С этой целью для всех случаев с опасным явлением сравнивалась средняя температура месяца $(T_{\rm cp})$, в котором наблюдалось данное опасное явление, со значениями средней многолетней температуры $(T_{\rm MH})$, рассчитанной за период с 1979 по 2021 г. В результате были определены температурные условия, при которых

наблюдалось опасное явление: жарко (при $\Delta T = T_{cp} - T_{MH} \ge 4^{\circ}C$), тепло (при 1°C $< \Delta T < 4^{\circ}C$), норма (при $-1^{\circ}C \le \Delta T \le 1^{\circ}C$), холодно (при $-4^{\circ}C < \Delta T < -1^{\circ}C$), очень холодно (при $\Delta T \le -4^{\circ}C$). На рис. 2.12 видно, что наибольшее количество случаев с сильными осадками наблюдается при малых отклонениях среднемесячной температуры от средней многолетней.



Рис. 2.12. Повторяемость случаев опасных явлений с сильными дождями в зависимости от температурных условий.

Таблица 2.5

Температурные	Статистическая характеристика, Па/с							
условия	Максимум	Минимум	Среднее	Медиана				
850 гПа								
Жарко	-0,178	-0,661	-0,302	-0,247				
Тепло	-0,059	-1,439	-0,467	-0,431				
Норма	-0,048	-1,077	-0,425	-0,380				
Холодно	-0,079	-0,955	-0,461	-0,440				
Очень холодно	-0,445	-0,463	-0,454	-0,454				
		700 гПа						
Жарко	-0,136	-1,101	-0,434	-0,342				
Тепло	-0,006	-1,668	-0,577	-0,551				
Норма	-0,085	-1,472	-0,488	-0,390				
Холодно	-0,008	-1,460	-0,569	-0,567				
Очень холодно	-0,547	-0,670	-0,608	-0,608				
		500 гПа						
Жарко	-0,139	-0,837	-0,353	-0,261				
Тепло	0,004	-1,629	-0,575	-0,482				
Норма	0,007	-1,885	-0,505	-0,426				
Холодно	0,000	-1,247	-0,569	-0,604				
Очень холодно	-0,255	-0,865	-0,560	-0,560				

Статистические характеристики скорости вертикальных движений (*Па/с*) при выпадении сильных дождей в зависимости от температурного режима

В табл. 2.5 представлены средние значения скорости вертикальных движений при сильных дождях в зависимости от температурного режима, из которой следует, что в целом наибольшие значения скорости вертикальных движений наблюдаются тогда, когда температурный режим месяца можно классифицировать как теплый. В таких ситуациях повышенная температура воздуха способствует более сильному прогреву и как следствие увеличению скорости вертикальных восходящих движений. При жаркой погоде в атмосфере наблюдается сильный дефицит водяного пара. При таких условиях формирование сильных осадков становится затруднительным. В холодную погоду, наоборот, в атмосфере, как правило, содержится достаточное количество водяного пара, но нет необходимого прогрева для образования сильной конвекции и сильных осадков.

В данном случае, скорости вертикальных движений в градации «очень холодно» не совсем показательны, так как в таких условиях наблюдалось лишь 2 случая с сильными осадками.

На значения скорости вертикальных движений в значительной степени может оказывать влияние неоднородный рельеф. Так, возвышенные формы рельефа способствуют увеличению интенсивности восходящих потоков, поэтому при прогнозах осадков необходимо учитывать местные орографические условия.

В западной части Пермского края преобладает низменный и равнинный рельеф. В восточной же части края, где проходят Уральские горы, рельеф имеет горный характер [85]. Также небольшая возвышенность располагается в южной части региона (южнее Перми). Высота метеорологических станций меняется от 95,6 до 462,8 *м* над уровнем моря [95].

Распределение средней скорости вертикальных движений на разных изобарических поверхностях, при которых наблюдались сильные осадки на территории Пермского края, представлено на рис. 2.13, из которого следует что рельеф Пермского края наиболее сильно оказывает влияние на распределение скорости восходящих потоков на изобарической поверхности

850 гПа. На поверхностях 700 и 500 гПа вертикальные движения имеют более равномерное распределение. Это связано с тем, что высота горных массивов не превышает 1500 *м* над уровнем моря, что соответствует средней высоте изобарической поверхности 850 гПа. С увеличением высоты влияние рельефа ослабевает.



Рис. 2.13. Распределение средней скорости вертикальных движений (*Па/с*), на разных изобарических поверхностях, при которых наблюдались сильные дожди по территории Пермского края: а) 850 *гПа*, б) 700 *гПа*, в) 500 *гПа*.

Также можно отметить, что на всех высотах прослеживается очаг высокой скорости вертикальных движений возле метеостанций Ножовка и Оса, расположенных у подножия Тулвинской возвышенности, имеющей высоту около 450–500 *м* над уровнем моря. Данный факт свидетельствует о том, что даже относительно невысокие формы рельефа могут оказывать влияние на поля вертикальных движений, что следует учитывать при составлении прогнозов осадков.

2.5. Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках теплого периода

Как было показано ранее, для образования сильных осадков необходимы два важных условия: высокое влагосодержание и интенсивные восходящие

вертикальные движения. К сожалению, ни влагосодержание, ни скорость вертикальных потоков напрямую измерить нельзя. Поэтому на практике используются различные формулы для их расчета или разные параметры, с помощью которых можно качественно их оценить.

Для оценки возможности развития опасных явлений, в том числе сильных метеорологами были разработаны осадков, индексы неустойчивости атмосферы [135]. Для характеристики вертикальных движений используются параметры, основанные на методе частицы: доступная потенциальная энергия неустойчивости САРЕ, параметр плавучести LI и энергия конвективного торможения CIN. Для определения условий увлажнения применяются параметры, В основе которых лежат температурно-влажностные характеристики: индекс Вайтинга (К), индекс Фатеева Н.П. (А), TQ Index и др. Кроме того применяются параметры для комплексного учета обоих факторов: индекс глубокой конвекции (DCI), индекс Томпсона (TI) и др.

Материалом для исследования послужила информация о датах, когда наблюдалось опасное явление (осадки градации ОЯ) в период с 1979 по 2019 гг., данных реанализа модели CFS (Climate Forecasting System) в сроки 0, 6, 12, 18 ВСВ, архива синоптических карт в программном комплексе ГИС Метео и данных метеостанций о наблюдаемых явлениях и их продолжительности [106].

Набор доступных метеорологических параметров в данных реанализа уже включает поля индексов САРЕ, СІN и LI, рассчитываемых по формулам 2.1–2.3, а индексы К, Фатеева Н.П., TQ Index, DCI, TI рассчитывались по данным реанализа с помощью программного пакета OpenGraDS по формулам 2.4–2.8.

САРЕ (convective available potential energy) – доступная потенциальная энергия конвекции (Дж/кг) («энергия неустойчивости») [135]:

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{T'_p - T'}{T'} dz, \qquad (2.1)$$

где g – ускорение свободного падения; T'_p, T' – виртуальная температура, на уровне p в поднимающейся частице и в окружающем воздухе соответственно; LFC – уровень конденсации; EL – уровень конвекции.

Значениям САРЕ от 0 до 1000 Дж/кг соответствует слабая неустойчивость атмосферы. При этом вероятны слабые ливневые осадки. При значениях 1000–2500 Дж/кг отмечается умеренная неустойчивость с ливнями, грозами и шквалами. Значениям САРЕ равным 2500–3500 Дж/кг соответствует сильная неустойчивость, а при значениях свыше 3500 Дж/кг – очень сильная неустойчивость с сильными и очень сильными грозами, шквалами и градом.

CIN (Convective inhibition) – энергия конвективного торможения (Дж/кг) [135]. Это количество энергии, необходимое частице воздуха для преодоления в нижней тропосфере задерживающего слоя:

$$CIN = g \int_{0}^{LFC} \frac{T'_{p} - T'}{T'} dz, \qquad (2.2)$$

где g – ускорение свободного падения; T'_p, T' – виртуальная температура, на уровне p в поднимающейся частице и в окружающем воздухе соответственно; *LFC* – уровень конденсации.

Значениям CIN в диапазоне –50÷0 Дж/кг соответствует слабая устойчивость атмосферы, но при этом возможна конвекция. При CIN, равной -200÷-50 Дж/кг наблюдается умеренная устойчивость, а при значениях ниже -200 Дж/кг – сильная устойчивость, при которой конвекция невозможна.

LI (Lifted index) – характеризует термическую стратификацию атмосферы по отношению к вертикальным перемещениям воздуха (°C) и рассчитывается по формуле [135]:

$$\mathbf{LI} = T_{500} - T_{parcell},\tag{2.3}$$

где T_{500} – температура окружающей среды на изобарической поверхности 500 гПа, °С; T_{parcell} – температура частицы на изобарической поверхности 500 гПа. При значениях LI от 0 до -2° C, атмосфера является слабо неустойчивой, от -2 до -6° C умеренно неустойчивой, а при значениях ниже -6° C сильно неустойчивой. При значениях индекса LI выше 0°C атмосфера устойчива.

Индекс К (K-index) – характеризует совместное влияние стратификации температуры и содержания водяного пара, °С [135]:

$$\mathbf{K} = (T_{850} - T_{500}) + \tau_{850} - (T_{700} - \tau_{700}), \qquad (2.4)$$

где T_{850} , T_{700} , T_{500} – температура окружающей среды на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 *гПа*, °C; τ_{850} , τ_{700} – температура точки росы на изобарических поверхностях 850 и 700 *гПа*, °C.

Значения К в диапазоне 25–30°С соответствуют слабо неустойчивой атмосфере, 30–35°С – умеренно неустойчивой, 35–40°С – сильно неустойчивой и свыше 40°С – крайне неустойчивой атмосфере.

Индекс для конвекции с низкой высотой верхней границы облачности (TQ Index) используется также для оценки потенциала развития конвекции в средней тропосфере [130]:

$$\Gamma Q = T_{850} + \tau_{850} - 1,7T_{700}, \qquad (2.5)$$

где T_{850} и T_{700} – температура воздуха на изобарических поверхностях 850 и 700 *гПа* соответственно, °C; τ_{850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 *гПа*, °C. При значениях индекса TQ 12°C может развиваться термическая и вынужденная конвекции, а при значениях 17°C и более существуют условия для развития свободной конвекции.

Индекс Фатеева Н.П. представляет собой усовершенствованный индекса Вайтинга [18]:

$$A = T_{850} - T_{500} - \sum_{i=850,700,600,500} DD_i , \qquad (2.6)$$

где DD_i — дефицит точки росы на *i*-ой изобарической поверхности, °C. Развитие конвекции ожидается при значениях индекса *A* больше нуля.

Индекс глубокой конвекции (Deep Convective Index, DCI) объединяет в себе температуру воздуха T_{850} , °C и точку росы τ_{850} , °C на изобарической поверхности 850 гПа и Lifted Index [135]:

$$DCI = T_{850} + \tau_{850} - LI, \qquad (2.7)$$

При значениях DCI 30°C и более ожидается развитие конвективных ОЯ.

Индекс Томпсона (Thompson Index, TI) рассчитывается по индексам К Index и Lifted Index [153] следующим образом:

$$TI = K - LI . (2.8)$$

При значении индекса ТІ 40°С и более ожидается развитие конвективных ОЯ.

Выбор индексов основан на том, что они учитывают факторы, необходимые для образования сильных осадков (конвекцию и влагосодержание), а также на простоте их использования. Выбранные индексы можно легко рассчитать, как по модельным данным, так и по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы.

Рассчитанные поля индексов сохранялись в растровом формате GeoTIFF, который помимо информации о значениях индексов содержит метаданные об их географической привязке. Это позволяет проводить пространственный анализ в таких программах как ArcGIS и QGIS.

Так как согласно [87] осадки измеряются два раза в сутки (3 и 15 ч ВСВ), индексы неустойчивости рассчитывались за 3 и за 6 ч до срока измерения осадков, и далее из двух значений выбиралось максимальное.

Ввиду того, что сильные осадки, как правило, носят локальный характер, имеет смысл определять значения параметров неустойчивости не только в конкретной точке (метеостанции, где было зафиксировано ОЯ), но и в некотором радиусе от нее [64]. Это должно позволить избежать занижения значения индексов в случаях пространственной ошибки. Поэтому в данном исследовании выбирались максимальные значения индексов в радиусе 50 *км* от станции, на которой было зафиксировано ОЯ. Для этого в программе QGIS для каждой метеостанции были построены буферные зоны с указанным выше радиусом, в пределах которых определялись максимальные значения индексов.

Всего за период с 1979 по 2020 г., как уже указывалось в параграфе 2.2, было зафиксировано 152 случая наступлении ОЯ, из которых 12 случаев приходится на сильный ливень, а остальная часть – на очень сильный дождь.

Выпадающие осадки могут достигнуть критериев ОЯ благодаря нескольким факторам. Во-первых, при наличии интенсивной конвекции и значительного запаса водяного пара в атмосфере, во-вторых, из-за медленно перемещающихся фронтов и широкой полосы осадков. Как правило, с первым фактором связано выпадение кратковременных и интенсивных ливневых осадков, а со вторым выпадение более продолжительных, но менее интенсивных обложных осадков. Кроме того, эти факторы могут действовать одновременно, поэтому актуальным является вопрос, каким типом осадков вызваны осадки критерия ОЯ на территории Пермского края, а также выявление зависимости величины индексов неустойчивости от этих типов.

В данном исследования тип выпадающих осадков определялся по данным метеостанций, методика определения которого подробно изложена выше в п. 2.4 данной работы.

Характер осадков определялся только для случаев, которые были зарегистрированы в период с 1997 по 2019 гг., ввиду отсутствия данных в более ранний период. Всего за это время наблюдалось 96 случаев с осадками градации ОЯ. Результаты анализа представлены на рис. 2.14.

Как видно из рис. 2.14 больше половины случаев с осадками градации ОЯ связаны с выпадением ливневых осадков (57%). В 36% случаев отмечались осадки смешанного типа и лишь 7% случаев связаны с выпадением обложных осадков.

Кроме того, для каждого случая с сильным дождем (сильные ливни не учитывались) была посчитана продолжительность осадков. Распределение продолжительности представлено на рис. 2.15, из которого следует, что чаще всего наблюдались сильные осадки с продолжительностью выпадения 4–6 и 10–12 ч. Причем меньшая продолжительность связана с ливневыми осадками, а большая – с обложными и осадками смешанного характера. Таким образом,

количество осадков в градации ОЯ чаще всего складывается из нескольких ливневых зарядов или имеет смешанный характер.



Рис. 2.14. Повторяемость (%) типов осадков, которые наблюдаются при опасном явлении.



Рис. 2.15. Повторяемость (%) сильных осадков в зависимости от их продолжительности (*ч*).

С целью изучения зависимости значений индексов от синоптической ситуации для каждого случая с осадками в градации ОЯ определялся тип фронтальной системы, с которой они были связаны. Для случаев, зарегистрированных в период с 2004 по 2020 г., анализ проводился по архиву синоптических карт с помощью программного комплекса ГИС Метео. Так как

архив карт ГИС Метео ограничен, то для расширения периода исследования (с 1979 по 2003 г.) были привлечены данные реанализа СFS. Для определения фронтальных разделов на основе реанализа были построены следующие карты: приземные, AT₈₅₀, OT_{500/1000} и карты распределения осадков. Построение карт проводилось с помощью программы OpenGraDS с последующим сохранением изображений в формате PNG.

Фронтальный анализ показал, что наибольшее число случаев сильных осадков было зафиксировано при прохождении фронтов окклюзии (41%) и холодных фронтов (26%). На внутримассовые осадки приходится 14% случаев. Меньше всего случаев с осадками в градации ОЯ наблюдается при волновых возмущениях на малоподвижных фронтах (7%) и при прохождении теплых фронтов (12%) (рис. 2.16).



Рис. 2.16. Повторяемость (%) фронтальных систем, с которыми связаны сильные осадки.

Такое распределение напрямую связано со стадиями развития циклонов, в которых они подходят к Пермскому краю. В параграфе 2.3 было показано, что чаще всего сильные осадки в Пермском крае связаны с южными или западными циклонами в стадии заполняющегося циклона. Кроме того, значительную роль в высокой повторяемости сильных осадков на фронтах окклюзии играют Уральские горы, которые способствуют удержанию циклонов над территорией Пермского края и их окклюдированию.

Для разных синоптических ситуаций характерны разные значения неустойчивости, ЧТО свидетельствует инлексов 0 разной степени неустойчивости атмосферы. В табл. 2.6 представлены некоторые статистические характеристики индексов неустойчивости в зависимости от наблюдаемой фронтальной системы, из которой видно, что для сильных дождей, связанных с внутримассовыми процессами и прохождением холодных фронтов в целом характерны более высокие значения параметров неустойчивости, чем для сильных дождей связанных с прохождением теплых фронтов, фронтов окклюзии и волновых возмущений.

Таблица 2.6

Значения	параметров	неустойчивости	в зависимости	ОТ	фронтальной системы
Sha tehna	napamerpob	negeron mboern	b Subireinatoerin	•	The second s

Индекс	Характеристика	Прохождение ХФ	Прохождение ТФ	Прохождение ФО	Волновое возмущение на малоподвижном фронте	Внутримассовые
CAPE,	Медиана	680	215	137	42	1198
Дж/кг	Среднее	1076	625	416	499	1219
CIN Dave/wa	Медиана	0	0	0	0	0
Сп, Дж/кг	Среднее	-2	0	-1	0	-2
DCL °C	Медиана	24	20	19	22	26
DCI, C	Среднее	24	19	17	22	26
Индекс	Медиана	21	18	22	22	16
Фатеева, °С	Среднее	20	18	21	19	14
K Index °C	Медиана	35	33	33	35	34
K macz, C	Среднее	35	33	33	35	34
U °C	Медиана	-2,3	-0,1	0,2	0,5	-4,0
LI, C	Среднее	-2,7	0,1	1,1	-0,5	-3,7
TI °C	Медиана	37	34	34	36	37
11, C	Среднее	36	34	32	35	37
TO Index °C	Медиана	20	18	18	20	20
IQ Index, °C	Среднее	19	18	18	20	20

Стоит также отметить, что ливневой тип осадков характерен для всех вышеперечисленных синоптических ситуаций. Однако чаще всего они

62

наблюдались на холодных фронтах. Обложные осадки и осадки смешанного характера чаще всего наблюдались на фронтах окклюзии. На холодных и теплых фронтах повторяемость обложных осадков оказалась одинаковой (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Тин осолжор	Прохождение		ние		Волновое возмущение на
тип осадков	ΧΦ	ΤФ	ΦО	внутримассовые	малоподвижном фронте
Ливневые	36	9	24	25	6
Обложные	14	14	72	_	_
Смешанные	18	3	70	_	9

Повторяемость типов осадков в зависимости от синоптической ситуации (%)

Также для разных типов осадков характерны разные значения индексов неустойчивости (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Значе	ния параметров неуст	тойчивости в зависимости от типов осадков
		Ŧ

IJ	V	ТИП ОСАДКОВ				
индекс	Характеристика	Ливневые	Обложные	Смешанные		
	Макс	3017	198	926		
САРЕ, Дж/кг	Мин	0	0	0		
	Среднее	980	38	146		
	Макс	0	0	0		
CIN, Дж/кг	Мин	-19	-1	-2		
	Среднее	-1	0	0		
	Макс	38	15	27		
DCI, °C	Мин	11	-3	-6		
	Среднее	25	8	13		
Инноко	Макс	25	25	31		
Фатеева, °С K Index, °C	Мин	-26	19	0		
	Среднее	17	22	22		
	Макс	42	36	39		
	Мин	21	22	19		
	Среднее	35	30	31		
	Макс	6,8	15,3	14,0		
LI, °C	Мин	-8,8	0,2	-3,6		
	Среднее	-2,6	5,3	2,7		
	Макс	46	39	37		
TI, °C	Мин	20	15	12		
	Среднее	37	26	29		
	Макс	24	20	22		
TQ Index, °C	Мин	14	10	8		
	Среднее	20	17	17		

Наибольшая разница наблюдается для индексов, основанных на методе частицы (САРЕ и LI), за исключением индекса СIN. Индексы, основанные на температурно-влажностных характеристиках атмосферы, изменяются от одного типа осадков к другому менее значительно, что свидетельствует о том, что для выпадения осадков, превышающих критерий ОЯ, атмосфера не обязательно должна быть сильно неустойчивой. Если атмосфера устойчива или слабонеустойчива, то возможность выпадения осадков градации ОЯ можно оценить по индексам, основанным на температурно-влажностных характеристиках.

В целом наблюдается довольно сильная обратная (для индекса LI прямая) зависимость между значениями индексов и продолжительностью выпадения осадков. Чем больше значения индексов неустойчивости, тем меньше продолжительность осадков.

Подводя итоги исследования в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Отмечается периодичность продолжительностью около 20 лет в распределении сильных дождей в исследуемом временном отрезке (1979–2021 г.). Подавляющее их большинство наблюдается в июле и июне (78%). Преимущественно сильные дожди наблюдались в дневное время (57%), остальные 43% — в ночное.

2. Пространственное распределение случаев с ОЯ в виде очень сильных дождей и сильных ливней по территории Пермского края носит меридиональный характер. Причем периодичность возрастает с запада на восток. Особую роль в распределении сильных осадков играют Уральские горы. Являясь естественным барьером, они задерживают циклоны и их фронты над Пермским краем, что способствует более длительному и интенсивному выпадению осадков.

3. В 88% случаев сильные дожди связаны с влиянием циклонов, остальные 12% случаев приходятся на внутримассовые процессы, происходящие в малоградиентных полях и периферии антициклонов.

4. Наибольшее число случаев сильных дождей в Пермском крае связано с влиянием южных циклонов, скорость перемещения которых над территорией Пермского края не превышает 10 *км/ч*.

5. Наибольший вклад в формирование сильных дождей вносят циклоны в стадии заполнения, которые прослеживаются до изобарической поверхности 300 гПа и выше. Средняя глубина циклона составила 998,2 гПа. Чаще всего сильные дожди связаны с небольшими, компактными циклонами.

6. Наибольшая скорость восходящих потоков наблюдается при сильных осадках, образующихся на атмосферных фронтах. При этом разница между значениями скорости на разных фронтах не значительна. Интенсивность вертикальных движений зависит от стадии развития циклонов, с которыми связаны сильные осадки. Наибольшая скорость вертикальных движений наблюдается тогда, когда циклон находится в стадии молодого барического образования. Наименьшие значения скорости вертикальных движений отмечаются при сильных осадках, не связанных С циклонической деятельностью, т.е. когда наблюдаются внутримассовые процессы.

7. Наименьшая скорость восходящих вертикальных движений на всех изобарических поверхностях наблюдается при выпадении ливневых осадков. Скорость восходящих вертикальных потоков при обложных и осадках смешанного типа оказывается в 1,5–2 раза выше, чем при ливневых. Однако полученные результаты сравнения скорости вертикальных движений при разных типах осадков необходимо считать предварительными ввиду того, что скорость вертикальных движений при ливневых осадках по данным реанализа может быть занижена.

8. Чем больше скорость восходящих потоков, максимум которой обычно достигается на изобарической поверхности 700 гПа, тем продолжительнее осадки. Однако при оценке продолжительности выпадения обложных осадков наиболее информативной является скорость вертикальных движений вблизи изобарической поверхности 850 гПа.

9. Наибольшие значения скорости вертикальных движений наблюдаются тогда, когда температурный режим месяца можно классифицировать как теплый. В таких ситуациях повышенная температура воздуха способствует более сильному прогреву и как следствие увеличению скорости восходящих движений.

10. Выявлено влияние рельефа на распределение скорости вертикальных движений. Наиболее сильно рельеф Пермского края оказывает влияние на распределение скорости восходящих потоков на изобарической поверхности 850 гПа. На поверхностях 700 и 500 гПа вертикальные движения имеют более равномерное распределение. При этом даже относительно невысокие возвышенности могут оказывать влияние на поля вертикальных движений, что следует учитывать при составлении прогнозов осадков.

11. Большая часть случаев осадков в градации ОЯ на территории Пермского края связана с прохождением холодных фронтов и фронтов окклюзии. Реже всего сильные осадки образуются на теплых фронтах. При этом для холодных фронтов характерны более высокие значения индексов неустойчивости, чем для фронтов окклюзии.

12. Сильные осадки, достигшие критерия ОЯ, имеют преимущественно ливневой и смешанный характер. Доля обложных осадков очень мала. Ливневые дожди чаще всего образуются на холодных фронтах и при внутримассовых процессах, а обложные и смешанные связаны преимущественно с фронтами окклюзии.

13. При разных типах осадков наблюдаются различия в значениях индексов неустойчивости. Больше всего эта разница проявляется в индексах, характеризующих неустойчивость атмосферы, и в меньшей степени свойственна индексам, характеризующим условия увлажнения, что свидетельствует о том, что для образования сильных осадков ливневого, обложного и смешанного типа характерны практически одинаковые температурно-влажностные характеристики.

14. Сильные дожди чаще всего имеют продолжительность выпадения от 4 до 6 ч. Для обложных дождей продолжительность выпадения составляет 10–12 ч. При этом существует довольно сильная обратная связь между продолжительностью осадков критерия ОЯ и значениями индексов неустойчивости. Чем больше значения индексов неустойчивости, тем меньшая продолжительность наблюдается.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА ОСАДКОВ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

3.1. Применение модели WRF для прогноза осадков теплого периода разной интенсивности

3.1.1. Характеристики применяемой модели WRF

Weather Research Forecasting (WRF) мезомасштабная and _ разработанная негидростатическая Национальным модель, центром атмосферных исследований США (NCAR) совместно с Университетской атмосферных корпорацией исследований (University Corporation for Atmospheric Research, UCAR) для проведения метеорологических исследований и прогнозирования [19]. Исходный код модели WRF находится в открытом доступе, и она может быть установлена и запускаться на широком спектре вычислительных машин ОТ мощных суперкомпьютеров ДО персональных компьютеров.

Модель WRF представляет собой модульную структуру и состоит из нескольких взаимодействующих между собой компонентов. Основными модулями являются [19, 21]:

1) Модуль предварительной обработки или препроцессинга (WRF Preprocessing System, WPS), который включает три программы для интерполяции рельефа, почвенных и других характеристик на выбранную расчетную сетку, извлечения полей метеовеличин из файлов в формате GRIB и их интерполяция в узлы сетки.

2) Модуль инициализации данных (WRFDA). Здесь на основе данных из предыдущего блока производится вертикальная интерполяция начальных данных в орографические координаты, а также формирование граничных условий. На этом этапе также может быть подключен модуль трехмерного усвоения данных (обычных, спутниковых и радиолокационных).

3) Модуль WRF включает в себя динамических ядра ARW или NMM и набор параметризаций процессов подсеточного масштаба. Ядра NMM и ARW используют различные численные методы для решения системы дифференциальных уравнений. В рамках проведения данного исследования была использована модель WRF с динамическим ядром ARW.

4) Модуль подготовки и вывода модельной продукции (постпроцесинг) позволяет рассчитывать дополнительные переменные, интерполировать их на изобарические поверхности или геометрическую высоту, а также преобразовывать выходные данные в разные форматы, например, код GRIB.

Расчет характеристик может проводится на серии вложенных сеток. Вложения могут производиться только в горизонтальной плоскости, поэтому по вертикали область расчетов должна быть одинаковой на всех сетках. Вложенные сетки должны быть ориентированы точно так же, как и материнская сетка и, наконец, шаг каждой дочерней сетки должен быть в целое число раз меньше, чем шаг родительской сетки. Имеется также возможность решения задачи на подвижной сетке [25].

Ввиду того, что модель WRF является региональной, начальными данными и граничными условиями служат результаты расчетов глобальной модели численного прогноза погоды. В рамках выполнения данной работы были использованы поля, полученные по модели GFS с шагом сетки 0,25° и шагом по времени 1 ч.

В настоящей работе запуск счета модели WRF начинался от 0 ч всемирного скоординированного времени (ВСВ) текущих суток. Первые 12 ч прогностические данные модели GFS заменялись данными расчетов объективного анализа, т.е. проводилась процедура предварительного усвоения фактически является анализом наблюдаемых полей которая данных, метеорологических величин. Это процедура позволяет избежать ошибок в приводят к ухудшению расчете, которые качества воспроизведения метеорологических величин в течение нескольких часов от начала прогноза, а также сформировать более точные начальные условия для прогноза [21, 71].

Таким образом, прогноз начинает считаться от срока 12 ВСВ, а максимальная заблаговременность прогноза составляет 39 *ч*.

Запуск модели проводился на двух сетках: внешней и вложенной. Внешняя сетка имеет шаг равный 9 *км* с количеством узлов 333×333, а вложенная – 3 *км* с количеством узлов 400×400. Временной шаг вывода данных составил 1 *ч*, с выдачей полей метеовеличин на двух сетках.

При моделировании на обеих сетках использовались следующие параметризации физических процессов:

– микрофизика – схема Томпсона;

– длинноволновая и коротковолновая радиация – схема GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory);

 приземный слой – схема Монина-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия;

- подстилающая поверхность и почва - модель NOAH;

- пограничный слой - схема Меллора-Ямады-Янича;

– конвекция – прямое моделирование (без параметризации).

Визуализация выходных данных модели WRF осуществлялась с использование программы OpenGrADS, с помощью которой поля метеорологических величин и параметров сохранялись в графическом формате PNG и растровом формате GeoTIFF. Формат GeoTIFF позволяет сохранять в каждом пикселе как информацию о значениях величин и параметров, так и метаданные об их географической привязке, что позволяет проводить пространственный анализ в таких геоинформационных системах как ArcGIS и QGIS.

Для выполнения работы были использованы выходные поля накопленных сумм количества осадков. Чтобы рассчитать какое количество осадков выпало за 12 u, для ночных осадков (которые измеряются в 3 u BCB) необходимо найти разницу между значениями, полученными в срок 15 u и срок 3 u от начала прогноза, а для дневных осадков (которые измеряются в 15 u BCB) необходимо найти разницу между значениями, полученными в срок 27

ч и срок 15 *ч* от начала прогноза. Таким образом заблаговременность прогноза выпадения ночных и дневных осадков составляет 15 и 27 *ч* соответственно. Необходимо отметить, что если опасное количество осадков было зафиксировано между сроками измерения, то для расчета прогностической суммы осадков находилась разница между сроком, который соответствует времени регистрации явления и сроком, который соответствует времения.

3.1.2. Методика оценки успешности численных прогнозов летних осадков разной интенсивности по модели WRF

Успешность прогноза метеорологических величин и явлений принято оценивать с помощью разнообразных показателей и критериев успешности, имеющих объективную шкалу оценочных значений. Применение тех или иных показателей и критериев зависит от целей исследования, оцениваемых явлений и величин.

В отечественной синоптической практике прогнозы погоды оцениваются согласно «Наставлению по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения» [88]. Согласно этому Наставлению осадки теплого периода разделены на несколько градаций по сумме количества осадков, выпавших за 12 ч (без осадков, 0,0-0,2; 0,3-2; 3-14; 15-49; \geq 50 мм). Успешность прогноза осадков оценивается путем сравнения прогностического количества осадков с данными градациями. Если количество прогнозируемых осадков попадает в ту же градацию, что и количество фактически выпавших осадков, то это оценивается на 100%. Занижение или завышение на одну градацию оценивается на 50%, а на две градации на 0%. Если прогноз давался по территории, то подсчитывается количество станций с успешностью 100, 50 и 0%, и вычисляется общая оправдываемость прогноза осадков по территории.

Особенностью метода по Наставлению [88], является то, что он предназначен для оценки оперативных прогнозов, которые составляются по уже принятым методикам и по нему можно оценить лишь общую оправдываемость прогноза. Однако, чтобы сравнить несколько методов прогноза или моделей только общей оправдываемости бывает недостаточно. Для объективной оценки требуется выявление сильных и слабых сторон каждого метода. Поэтому в исследованиях применяют метод оценки успешности прогнозов погоды описанный в «Методических указаниях по (оперативных) проведению производственных испытаний новых И усовершенствованных методов гидродинамических и гелиогеографических прогнозов» (РД 52.27.284-91) [82]. В рамках выполнения данной работы, оценка успешности будет проводится согласно этой методике.

В соответствии с данным методом оценка качества прогноза осадков проводится по факту наличия (отсутствия) и количеству осадков. Для вычисления показателей успешности прогноза составляется таблица сопряженности (табл. 3.1), где n_{11} – число случаев, когда осадки и прогнозировались и наблюдались; n_{12} – число случаев, когда осадки прогнозировались, но не наблюдались; n_{10} – число случаев, когда осадки прогнозировались осадки; n_{21} – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие осадков, и они не наблюдались; n_{22} – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие осадков, и они не наблюдались; n_{20} – число случаев, когда осадки прогнозировалось отсутствие осадков, и они не наблюдались; n_{20} – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие осадков, и они не наблюдались; n_{20} – число случаев с осадками; n_{02} – число случаев без осадков; n_{00} – общее количество прогнозов.

Таблица 3.1

Таблица сопряженности для прогноза осадков

Прогнор	Наблюд	Curaca	
прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
Осадки	n_{11}	n_{12}	n_{10}
Без осадков	n_{21}	<i>n</i> ₂₂	n_{20}
Сумма	n_{01}	n_{02}	n_{00}
По данным таблицы сопряжённости рассчитываются следующие показатели успешности прогноза факта наличия (отсутствия) осадков:

1. Общая оправдываемость прогноза U, характеризующая процент успешных прогнозов:

$$U = (n_{11} + n_{22}) / n_{00}. \tag{3.1}$$

2. Оправдываемость прогноза наличия осадков U_o (отсутствия осадков $U_{\delta o}$), характеризующая процент успешных прогнозов наличия (отсутствия) осадков:

$$U_o = n_{11} / n_{10}, \tag{3.2}$$

$$U_{\delta o} = n_{22} / n_{20}. \tag{3.3}$$

3. Предупрежденность прогноза наличия П_о (отсутствия П_{бо}) осадков, характеризующая процент успешно предсказанных случаев выпадения (отсутствия) осадков:

$$\Pi_o = n_{11} / n_{01}, \tag{3.4}$$

$$\Pi_{\delta o} = n_{22} / n_{02}. \tag{3.5}$$

4. *Критерий Пирса-Обухова T*, характеризующий успешность совпадения прогностических и фактических зон осадков (при идеальном прогнозе T = 1, при абсолютно некорректном прогнозе T = -1):

$$T = n_{11}/n_{01} - n_{12}/n_{02}. aga{3.6}$$

Отрицательное значение T свидетельствует о том, что отношение ошибочных прогнозов явления к фактическому числу дней без явления превышает отношение оправдавшихся прогнозов явления к фактическому числу дней с явлением (Π_{g}). Положительные значения T свидетельствуют о том, что предупрежденность явления (Π_{g}) превышает отношение ошибочных прогнозов явления к фактическому числу дней без явления [82].

Ввиду того, что соотношение рассчитанных показателей для разных методов прогноза может быть разное (одни высокие, другие низкие даже при сравнительно высокой общей оправдываемости прогнозов), то для

правильного вывода о надежности метода можно судить по сумме показателей. Согласно [82] сумма $U_o + \Pi_o$ и $U_{\delta o} + \Pi_{\delta o} \ge 130\%$ свидетельствует об удовлетворительном качестве прогноза.

При расчете показателей за факт выпадения осадков принимается количество осадков в узле сетки ≥ 0,1 *мм*/12 ч. Количество осадков < 0,1 *мм*/12 ч принимается за факт отсутствия осадков.

Для оценки точности прогноза количества осадков рассчитываются следующие статистические характеристики:

1. Средняя абсолютная ошибка прогноза δQ :

$$\delta Q = \frac{1}{n_{00}} \sum_{i=1}^{n_{00}} |Q_{\Pi i} - Q_{\Phi i}|, \qquad (3.7)$$

где Q_{Π} – прогностическое количество осадков, Q_{Φ} – фактическое количество осадков.

2. Средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза δ:

$$\delta = \frac{1}{n_{00}} \sum_{i=1}^{n_{00}} (Q_{\Pi i} - Q_{\Phi i}) \,. \tag{3.8}$$

Систематическая ошибка позволяет судить о так называемой фоновой погрешности, т.е. о методическом среднем смещении прогностического поля осадков. Положительные значения указывают на систематическое завышение прогностических значений количества осадков, отрицательные – на их занижение.

Кроме перечисленных показателей успешности согласно [82] рассчитывается критерий надежности Н.А. Багрова (*H*):

$$H = \frac{U - U_0}{1 - U_0},\tag{3.9}$$

где $U_0 = (m_1 + m_2)/n_{00}$ – оправдываемость случайных прогнозов; $m_1 = (n_{01} \cdot n_{10})/n_{00}, m_2 = (n_{02} \cdot n_{20})/n_{00}).$

Чем выше значения *H*, тем лучше качество прогноза.

Дополнительно были рассчитаны другие показатели успешности модельных прогнозов, использующиеся в разных исследованиях.

Показатель ложных тревог FAR – это доля прогнозируемых событий, которые были предсказаны, но не наблюдались. Лучший результат соответствует FAR = 0, а наихудший отмечается при FAR = 1 [77]:

$$FAR = n_{12} / n_{10}. \tag{3.10}$$

Следующий показатель (GSS) включает коррекцию воздействия ложных осадков. Значения GSS колеблются от -1/3 до 1. При GSS = 0 результат моделирования осадков считается случайным, положительные значения GSS указывают на уровень точности прогноза, а идеальным прогноз осадков считается, когда GSS = 1 [77]:

$$GSS = (n_{11} - E)/(n_{11} + n_{12} + n_{21} - E), \qquad (3.11)$$

где $E = (n_{11} + n_{12}) \cdot (n_{11} + n_{21}) / n_{00}.$

3.1.3. Численный прогноз осадков разной интенсивности на территории Урала с помощью модели WRF

Для оценки качества прогноза осадков летнего периода моделью WRF был выбран июль 2020 г. В этот месяц наблюдались дни как с выпадением осадков, так и с их отсутствием. Кроме того, отмечались осадки в категории опасного явления.

В качестве проверочного материала послужили данные измерений полусуточных сумм осадков на метеостанциях. Для увеличения числа случаев с осадками и без них и получения репрезентативной выборки к метеостанциям, расположенным на территории Пермского края были добавлены метеостанции, расположенные в Свердловской, Челябинской, Курганской областях, республиках Удмуртия и Башкортостан. Всего 127 метеостанций. Список метеостанций и координаты их расположения представлены в Приложении 2.

Как было отмечено в пункте 3.1, визуализация выходных данных модели WRF осуществлялась с использование программы OpenGrADS, с помощью которой поля осадков были сохранены в растровом формате GeoTIFF. Далее с использованием программ ArcGIS и QGIS из полученных изображений извлекались значения количества осадков, накопленные за 12 *ч*.

Прогностическое значение количества осадков на метеостанции определялось тремя способами: 1) в точке расположения метеостанции (по ближайшему к ней узлу сетки); 2) по максимальному значению узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 *км*; 3) по среднему значению, которое рассчитывалось по данным всех узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 *км*.

Дополнительно для определения факта выпадения осадков или их отсутствия был реализован еще один способ. Выпадение осадков на метеостанции прогнозировалось, если количество узлов сетки со значением более 0,1 *мм*/12 *ч* превышало 50% от всех узлов, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 *км*. Если таких узлов было менее 50%, то принималось, что на метеостанции прогнозируется отсутствие осадков. Далее этот метод условно будет называться «по соотношению узлов сетки».

Таблица 3.2

Способ изморония	Прогнор	Наблю	далось	Cuanto
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	429	310	739
расположения	Без осадков	206	1767	1973
метеостанции	Сумма	635	2077	2712
Максимальное	Осадки	621	1332	1953
значение в	Без осадков	9	726	735
радиусе 50 км	Сумма	630	2058	2688
Среднее значение	Осадки	579	707	1286
в радиусе 50 км	Без осадков	51	1351	1402
	Сумма	630	2058	2688
По соотношению	Осадки	427	251	678
узлов сетки	Без осадков	203	1807	2010
	Сумма	630	2058	2688

Таблицы сопряженности для прогнозов на срок 3 ч ВСВ на сетке с шагом 3 км

Составленные таблицы сопряженности на сроки 3 и 15 ч ВСВ для сетки с шагом 3 км представлены в табл. 3.2 и 3.3.

Таблица 3.3

Сполоб изморация	Прогнор	Наблю	Наблюдалось		
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма	
В точке	Осадки	678	591	1269	
расположения	Без осадков	111	1216	1327	
метеостанции	Сумма	789	1807	2596	
Максимальное	Осадки	778	1474	2252	
значение в	Без осадков	6	314	320	
радиусе 50 км	Сумма	784	1788	2572	
Среднее значение	Осадки	750	1131	1881	
в радиусе 50 км	Без осадков	34	657	691	
	Сумма	784	1788	2572	
По соотношению	Осадки	702	592	1294	
узлов сетки	Без осадков	82	1196	1278	
	Сумма	784	1788	2572	

Таблицы сопряженности для прогнозов на срок 15 ч ВСВ на сетке с шагом 3 км

Следует отметить, что суммарное число случаев для разных способов измерения немного отличается. Это связано с тем, что некоторые метеостанции расположены на границе расчётной области и для них правильно определить количество осадков возможно только в точке расположения метеостанции по ближайшему к ней узлу сетки. Поэтому количество осадков и факт их наличия или отсутствия по трем другим методам не определялся и такие метеостанции не учитывались.

По данным таблиц сопряженности были рассчитаны показатели успешности модельных прогнозов осадков с разной заблаговременностью, которые были рассчитаны на сетке с шагом 3 *км*. Результата расчета представлены в табл. 3.4.

Рассмотрим показатели успешности более детально. В зависимости от заблаговременности прогноза и способа расчета количества осадков общая оправдываемость *U* изменялась от 50 до 83%. При этом, в срок 3 *ч* ВСВ общая оправдываемость прогнозов оказывается выше, чем в срок 15 *ч* ВСВ. Наиболее высокая общая оправдываемость прогнозов в оба срока отмечается для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции.

При рассмотрении оправдываемости наличия U_o и отсутствия $U_{\delta o}$ осадков было выявлено, что модель WRF лучше прогнозирует отсутствие осадков, чем их наличие. Оправдываемость отсутствия осадков изменялась от 90 до 99%. Наибольшие значения $U_{\delta o}$ отмечаются для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 *км*, а наименьшие – для способа измерения в точке расположения метеостанции. В целом оправдываемость отсутствия осадков в срок 15 *ч* ВСВ оказывается выше, чем для срока 3 *ч* ВСВ.

Таблица 3.4

Показатель успешности	В т распол метеос	очке южения станции	Максил значе радиус	мальное ение в е 50 км	Сре значе радиус	днее ение в е 50 км	Г соотно узлов	Іо ршению сетки
	3	15	3	15	3	15	3	15
<i>U</i> , %	81	73	50	42	72	55	83	74
$U_o, \%$	58	53	32	35	45	40	63	54
$U_{ ilde{o}o},$ %	90	92	99	98	96	95	90	94
$\Pi_o, \%$	68	86	99	99	92	96	68	90
$\Pi_{ ilde{o}o},$ %	85	67	35	18	66	37	88	67
Т	0,53	0,53	0,34	0,17	0,58	0,32	0,56	0,56
Н	0,50	0,45	0,20	0,11	0,42	0,23	0,54	0,48
FAR	0,42	0,47	0,68	0,65	0,55	0,60	0,37	0,46
GSS	0,33	0,29	0,11	0,06	0,27	0,13	0,37	0,31
$U_o + \Pi_o, \%$	126	139	130	134	137	136	131	144
$U_{\delta o} + \Pi_{\delta o}, \%$	175	159	134	116	162	132	178	160
б, мм	0,23	0,66	7,51	13,69	0,31	0,72	_	_
бО, мм	1,41	2,51	7,69	13,99	1,31	2,33	_	_

Показатели успешности модельных прогнозов разной заблаговременности, полученные на сетке с шагом 3 *км*

Оправдываемость наличия осадков U_o изменяется от 32 до 63%. Наиболее высокие значения наблюдаются для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции. Наименьшие значения U_o характерны для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 *км*. В целом значения U_o для прогнозов на срок 3 *ч* ВСВ выше, чем на срок 15 *ч* ВСВ.

Предупрежденность выпадения осадков Π_o изменялась от 68 до 99 %. Максимальные значения Π_o отмечаются для способа измерения максимального значения в радиусе 50 км и существенно превышают значения Π_o для других методов. Такое распределение связано с тем, что когда факт выпадения осадков в пункте прогноза устанавливается по максимальному значению в каком-то радиусе от этого пункта, то количество случаев, когда прогнозируется выпадение осадков может значительно превысить количество случаев, когда они отсутствовали. В такой ситуации говорят о ложных тревогах. Если посмотреть на показатель *FAR*, который показывает долю ложны тревог, то можно заметать, что для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 *км* он имеет наибольшее значение среди всех других способов: 0,68 для срока 3 *ч* ВСВ и 0,65 для срока 15 *ч* ВСВ. Предупрежденность выпадения осадков на срок 15 *ч* ВСВ оказалась выше, чем на срок 3 *ч* ВСВ.

Предупрежденность отсутствия осадков Π_{60} имеет зеркальное распределение относительно предупрежденности наличия осадков. Наибольшие значения наблюдаются для способов по соотношению узлов и в точке расположения метеостанции. При этом предупрежденность осадков для этого и других способов значительно выше в срок 3 *ч* ВСВ, чем в 15 *ч* ВСВ.

Величина критерия Пирса-Обухова Т изменялась от 0,17 до 0,58, что свидетельствуют о том, что для всех способов определения суммы осадков (Π_o) предупрежденность выпадения осадков превышает отношение ошибочных прогнозов наличия осадков к фактическому числу дней без осадков. Наиболее высокие значения критерия Т характерны для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции и равняются более 0,5 в оба срока измерения, что свидетельствует о большой практической значимости данных способов. Для двух других способов величина критерия Пирса-Обухова в срок 15 ч ВСВ в два раза меньше, чем в срок 3 ч ВСВ, что свидетельствует о том, что с ростом заблаговременности прогноз по этим методам становится близок к случайному.

Критерий надежности Н.А. Багрова (*H*) в зависимости от способа измерения и заблаговременности изменялся от 0,11 до 0,54. В общем случае, чем выше значения *H*, тем лучше качество прогноза. Однако согласно [82], если значение критерия Н.А. Багрова ниже 0,33, то такой прогноз считается

ненадежным. Чем ниже значение H, тем ближе оправдываемость метода прогноза к оправдываемости случайного прогноза. Среди примененных четырёх способов определения факта выпадения осадков или их отсутствия наибольшую надёжность имеют способы по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции. Величина H для этих способов превышает 0,5 в срок 3 ч ВСВ и 0,45 в срок 15 ч ВСВ.

О случайности прогноза, можно также судить по показателю GSS. Значения GSS изменялись от 0,06 до 0,37. Околонулевые значения показателя наблюдались для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 км, что свидетельствует о том, что прогноз факта наличия или отсутствия осадков находится для этого способа практически на уровне случайного. Случайность прогноза в этом случае заключается в том, что если для пункта на протяжении какого-то времени давать только факт наличия осадков, то успешность такого прогноза будет зависеть от повторяемости выпадения осадков, а не от качества прогноза. Поэтому такой прогноз будет иметь случайный характер, а величина оправдываемости такого прогноза не объективной.

Наибольшие значения показателя GSS наблюдаются для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции, что свидетельствует о большей практической значимости данных прогнозов.

Также важным показателем при оценке разных методов прогноза является показатель ложных тревог *FAR*. С помощью данного показателя можно оценить ценность того или иного метода прогноза. Так, например, если два метода имеют схожие показатели предупрежденности явления, то большую практическую значимость будет иметь тот, у которого показатель ложных тревог меньше. Однако надо иметь ввиду, что если метод показывает низкую оправдываемость прогноза, то низкие значения показателя ложных тревог не могут служить основанием для того, чтобы отдать предпочтение этому методу. Поэтому необходимо рассматривать все показатели комплексно и соблюдать между ними некоторый баланс.

В данном исследовании показатель *FAR* изменялся от 0,68 до 0,37. Наименьшие значения характерны для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции. В срок 3 *ч* ВСВ прогнозы дают меньше ложных тревог, чем в срок 15 *ч* ВСВ.

Если рассматривать сумму показателей $U_o+\Pi_o$ и $U_{\delta o}+\Pi_{\delta o}$, то в целом они оказываются близки или больше 130% для всех способов, что свидетельствует об удовлетворительном прогнозе. Можно отметить, что суммарные показатели отсутствия выпадения осадков превосходят сумму показателей наличия осадков. И если значения суммы $U_o+\Pi_o$ между методами не сильно различаются, то сумма $U_{\delta o}+\Pi_{\delta o}$ имеет более существенные различия. Суммарный показатель отсутствия выпадения осадков более высокий для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции. Наибольшую роль в таком распределении сыграло меньшее количество ложных тревог у данных способов, и, соответственно, практическая значимость данных способов в прогнозе выше.

Кроме прогноза наличия или отсутствия осадков важно, как можно точнее прогнозировать их количество. В данном исследовании оценка прогноза количества осадков проводилась только ЛИШЬ ДЛЯ трех способов. Распределение как средней абсолютной ошибки δQ , так и систематической ошибки δ по способам определения количества осадков одинаково. Наибольшие ошибок значения характерны для способа измерение максимального значения осадков в радиусе 50 км. Величина ошибок для этого способа в несколько раз превышает величину ошибок для других способов. Величины ошибок для способов измерения количества осадков в точке расположения метеостанции и среднее значение в радиусе 50 км в целом сопоставимы между собой. Положительные значения ошибок говорят о том, что все способы в среднем завышают прогностическое количество выпавших осадков. Причем в срок 15 ч ВСВ, т.е. с ростом заблаговременности, это завышение увеличивается.

Далее рассмотрим прогноз количества осадков, рассчитанный на сетке с шагом 9 км. Таблицы сопряженности, на основе которых проводился расчет представлены в табл. 3.5 и 3.6. Общее количество прогнозов, составленное по сетке с шагом 9 км, превышает количество прогнозов по сетке с шагом 3 км ввиду того, что расчетная область во втором случае была меньше, и не все метеостанции вошли в нее. Расчетная область более крупной сетки имела большие размеры и все заявленные метеостанции в нее попали.

Таблица 3.5

Снороб ириороция	Прогнор	Наблю	Наблюдалось		
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма	
В точке	Осадки	499	522	1021	
расположения	Без осадков	183	1844	2027	
метеостанции	Сумма	682	2366	3048	
Максимальное	Осадки	659	1463	2122	
значение в	Без осадков	23	903	926	
радиусе 50 км	Сумма	682	2366	3048	
Среднее значение	Осадки	618	878	1496	
в радиусе 50 км	Без осадков	64	1488	1552	
	Сумма	682	2366	3048	
По соотношению	Осадки	466	330	796	
узлов сетки	Без осадков	216	2036	2252	
	Сумма	682	2366	3048	

Таблицы сопряженности для прогнозов на срок 3 ч ВСВ на сетке с шагом 9 км

Таблица 3.6

Таблицы сопряженности для прогнозов на срок 15 ч ВСВ на сетке с шагом 9 км

Спороб изморония	Прописа	Наблю	одалось	Cupara
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	704	610	1314
расположения	Без осадков	131	1473	1604
метеостанции	Сумма	835	2083	2918
Максимальное	Осадки	818	1377	2195
значение в	Без осадков	17	706	723
радиусе 50 км	Сумма	835	2083	2918
Среднее значение	Осадки	798	975	1773
в радиусе 50 км	Без осадков	37	1108	1145
	Сумма	835	2083	2918
По соотношению	Осадки	697	468	1165
узлов сетки	Без осадков	138	1615	1753
	Сумма	835	2083	2918

По данным таблиц сопряженности также были рассчитаны показатели успешности прогноза осадков. Результаты расчета представлены в табл. 3.7.

Показатель успешности	В то распол- метеос	очке ожения танции	Максим значе радиус	мальное ение в е 50 км	Сре, значе радиус	днее ние в е 50 <i>км</i>	Г. соотно узлов	lo шению сетки
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
<i>U</i> , %	77	75	51	52	69	65	82	79
$U_o, \%$	49	54	31	37	41	45	59	60
$U_{{\it o}o},\%$	91	92	98	98	96	97	90	92
$\Pi_o, \%$	73	84	97	98	91	96	68	83
$\Pi_{{\it o}o},\%$	78	71	38	34	63	53	86	78
Т	0,51	0,55	0,35	0,32	0,54	0,49	0,54	0,61
Н	0,43	0,47	0,20	0,21	0,38	0,36	0,51	0,55
FAR	0,51	0,46	0,69	0,63	0,59	0,55	0,41	0,40
GSS	0,28	0,31	0,11	0,12	0,23	0,22	0,35	0,38
$U_o + \Pi_o, \%$	122	138	128	135	132	141	127	143
$U_{\delta o} + \Pi_{\delta o}, \%$	169	163	136	132	159	150	176	170
δ, мм	0,47	0,65	6,20	9,65	0,49	0,72	_	_
δQ , мм	1,56	2,36	6,48	10,09	1,42	2,20	_	_

Показатели успешности модельных прогнозов разной заблаговременности, полученные на сетке с шагом 9 км

Таблица 3.7

Распределение значений показателей успешности по способам определения осадков при увеличении шага сетки имеет такой же характер, как и при меньшем шаге сетки. Однако их величина немного различается.

Значения общей оправдываемости U в срок 3 v BCB для всех способов либо не изменились, либо уменьшились на 1–3%, а в срок 15 v BCB, наоборот, наблюдается рост общей оправдываемости от 2 до 10%.

Похожая картина наблюдается и для оправдываемости наличия осадков U_o . Уменьшение значения показателя в срок 3 ч ВСВ составило 2–9%. Причем, наибольшее снижение отмечалось для способов, имеющих на сетки 3 км большую оправдываемость. В срок 15 ч ВСВ значения оправдываемости наличия осадков увеличилось на 1–6%. Значения оправдываемости отсутствия осадков $U_{\delta o}$ претерпели небольшие изменения, которые в зависимости от способа и срока составили ±1%.

Предупрежденность выпадения осадков Π_o в целом имела тенденцию к уменьшению величины. Лишь для способа определения осадков в точке расположения метеостанции в срок 3 ч ВСВ наблюдался рост на 5%. Для остальных способов и сроков наблюдалось либо сохранение величины показателя, либо ее уменьшение на 2–7%. Величина предупрежденности отсутствия осадков Π_{6o} также имеет тенденцию к уменьшению для срока 3 ч ВСВ на 2–7%. Только для способа определения максимального значения в радиусе 50 км наблюдается увеличение показателя на 4%. Для срока 15 ч ВСВ отмечается рост предупрежденности отсутствия осадков на 4–16%.

Значения критерия Пирса-Обухова *T* в срок 3 *ч* ВСВ при увеличении шага сетки в целом имеют тенденцию к уменьшению на 2–4%. В свою очередь в срок 15 *ч* ВСВ значения критерия увеличиваются на 2–17 %.

Надежность прогнозов H в срок 3 v BCB также уменьшалась на величину равную 4–6%, а в срок 15 v BCB наблюдается ее увеличение на 2–11%.

Количество ложны тревог *FAR* в срок 3 u BCB при увеличении шага сетки возросло на 1–9%, а в срок 15 u BCB наоборот, уменьшилось на 1–6%.

Показатель GSS имеет аналогичную тенденцию изменений по срокам. Для срока 3 ч ВСВ его величина уменьшилась, а для срока 15 ч ВСВ увеличилась. Величина изменения составила 2–9%.

Суммарные показатели успешности прогноза наличия $U_o + \Pi_o$ и отсутствия осадков $U_{\delta o} + \Pi_{\delta o}$ с увеличением шага сетки изменились незначительно. В зависимости от способа определения осадков и срока прогноза величина этих изменений не превышает в среднем 8–10%.

Значения средней абсолютной ошибки δQ и систематической ошибки δ с увеличением шага расчетной сетки также изменились. В срок 3 v BCB наблюдается увеличение величины ошибок, а в срок 15 v BCB наоборот, их уменьшение. Исключением является способ определения максимального значения в радиусе 50 *км*, для которого величина ошибок в оба срока уменьшилась, но, несмотря на это, все равно превосходит по значению величину ошибок для других способов.

В целом прослеживается тенденция, указывающая на то, что чем больше осадков выпало, тем абсолютное значение ошибки больше. Эту зависимость наглядно отображают коэффициенты корреляции (табл. 3.8).

Таблица 3.8

	Шаг сет	тки 3 <i>км</i>	Шаг сетки 9 км		
Способ измерения	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	
В точке расположения метеостанции	0,63	0,64	0,56	0,57	
Максимальное значение в радиусе 50 км	0,28	0,08	0,22	0,15	
Среднее значение в радиусе 50 км	0,67	0,73	0,60	0,69	

Значения коэффициентов корреляции между количеством фактически выпавших осадков и абсолютной ошибкой для прогнозов с разной заблаговременностью

Как следует из табл. 3.8, наиболее тесная связь прослеживается для способов определения количества осадков в точке расположения метеостанции и среднее значение в радиусе 50 *км*. Причем на сетке с шагом 3 *км* значения коэффициентов корреляции выше, чем для сетки с шагом 9 *км*. Также следует отметить, что чем больше заблаговременность прогноза, тем сильнее становится эта зависимость.

Фактически из полученных значений коэффициентов корреляции можно сделать вывод о том, что чем большее количество осадков модель прогнозирует, тем выше вероятность того, что это значение будет завышено (фактически осадков выпадет меньше). И наоборот, чем меньшее количество осадков прогнозирует модель, тем вероятнее, что ошибка будет минимальной.

Отдельно была проведена оценка успешности прогноза сильных осадков, сумма которых превышала 30 *мм* за 12 *ч*. Такой критерий количества осадков был выбран ввиду того, что для метеостанций, находящихся в ливнеопасных районах это значение является критерием опасного явления (очень сильный дождь). Для расчета показателей успешности, также были составлены таблицы сопряженности, представленные в Приложении 3. Значения полученных показателей успешности представлены в табл. 3.9 и 3.10.

Таблица 3.9

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максин значе радиус	Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 <i>км</i>	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	
<i>U</i> , %	99	99	92	83	100	99	
$U_o, \%$	0	0	2	2	0	0	
$U_{ar{o}o},$ %	100	99	100	100	100	99	
$\Pi_o, \%$	0	0	57	62	0	0	
$\Pi_{ ilde{o}o}$, %	100	99	92	84	100	100	
Т	0,00	-0,01	0,49	0,45	0,00	0,00	
Н	0,00	-0,01	0,03	0,03	0,00	0,00	
FAR	1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	1,00	
GSS	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	
$U_o + \Pi_o, \%$	0	0	59	63	0	0	
$U_{\delta o} + \Pi_{\delta o}, \%$	199	199	192	183	200	199	

Показатели успешности модельных прогнозов сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) разной заблаговременности, полученные на сетке с шагом 3 км

Таблица 3.10

Показатели успешности модельных прогнозов сильных осадков (≥ 30 *мм*/12 *ч*) разной заблаговременности, полученные на сетке с шагом 9 *км*

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максим значе радиус	Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 <i>км</i>	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	
<i>U</i> , %	99	99	93	88	99	99	
$U_o, \%$	0	0	2	1	0	0	
$U_{{\it o}o},\%$	100	99	100	100	100	99	
$\Pi_o, \%$	0	0	50	25	0	0	
$\Pi_{\delta o},$ %	99	99	93	88	100	100	
Т	-0,01	-0,01	0,43	0,13	0,00	0,00	
Н	0,00	-0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	
FAR	1,00	1,00	0,98	0,99	1,00	1,00	
GSS	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	
$U_o + \Pi_o, \%$	0	0	52	26	0	0	
$U_{ ilde{o}o} + \Pi_{ ilde{o}o}, \%$	199	199	193	188	199	199	

Как следует из табл. 3.9 и 3.10, общая оправдываемость *U* прогнозов сильных осадков близка к 100% не зависимо от заблаговременности прогноза, шага расчетной сетки и способа определения количества осадков. При более детальном рассмотрении, можно увидеть, что такие высокие значения *U* связаны с высокими значениями оправдываемости отсутствия сильных

осадков $U_{\delta o}$, при этом оправдываемость наличия сильных осадков равна нулю. Это говорит о том, что все случаи, когда фактически наблюдалось выпадение сильных осадков, моделью WRF не были спрогнозированы. По этой же причине наблюдаются высокие значения предупрежденности отсутствия сильных осадков $\Pi_{\delta o}$ и низкие значения предупрежденности выпадения осадков Π_o . Исключением являются значения Π_o для случая, когда количество осадков определяется по максимальному значению в радиусе 50 км от пункта прогноза. Для этого способа предупрежденность выпадения осадков достигает 60%, при расчете на сетке с шагом 3 км. Также отмечаются самые высокие значения критерия Пирси-Обухова *T*, которые достигаю 0,5. Этот факт свидетельствует о том, что для прогнозов сильных осадков характерно наличие пространственной ошибки. Это подтверждает и высокое значение ложных тревог, т.е. модель WRF способна прогнозировать сильные осадки, но при их локализации в пространстве и времени наблюдаются существенные ошибки.

3.2. Прогноз осадков теплого периода с помощью индексов неустойчивости атмосферы на территории Урала с использованием выходных данных модели WRF

Как было отмечено в главе 1, для прогноза опасных явлений, в том числе сильных осадков летнего периода, могут быть использованы индексы неустойчивости атмосферы. По величине индексов можно судить о степени неустойчивости атмосферы и, следовательно, о вероятности формирования сильных осадков.

Для оценки возможности использования индексов неустойчивости для прогноза осадков летнего периода на территории Урала в рамках данной работы были взяты три наиболее популярных индекса, основанные на методе частицы: САРЕ, CIN, LI. Их описание и формулы для расчета были приведены в пункте 2.4. Величина индексов была рассчитана по выходным данным

модели WRF по сеткам с шагом 3 и 9 *км* и на сроки 3 и 15 *ч* ВСВ. Значения индексов определялись тремя способами: 1) в точке расположения метеостанции; 2) по максимальному значению в радиусе 50 *км* от метеостанции; 3) по среднему значению, которое рассчитывалось по данным всех узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 *км*.

Так как значения всех индексов разделяются на градации, которым соответствуют разная степень неустойчивости атмосферы и интенсивность прогнозируемого явления, то в теории в зависимости от того, какое значение индекса прогнозируется можно прогнозировать и ожидаемое количество осадков. В отечественной синоптической практике при прогнозах осадков дается не конкретная цифра, а лишь количественная характеристика, которой соответствует диапазон количества осадков. Так согласно [88] характеристике преимущественно без осадков соответствует диапазон 0,01-0,2 *мм*, небольшим осадкам 0,3-2 *мм*, умеренным 3-14 *мм*, сильным 15-49 *мм*, очень сильным ≥ 50 *мм*. Таким образом, каждую градацию индекса, можно соотнести с количественной характеристикой осадков и по прогностическому значению индекса прогнозировать ожидаемое количество осадков.

Для оценки успешности прогноза осадков с помощью индексов была использована методика, представленная в [88], только вместо прогнозируемого количества осадков были использованы прогнозируемые значения индекса. Также градации 0,01–0,2 и 0,3–2 *мм* были объединены в одну, так как такую разницу уловить с помощью индексов невозможно. В табл. 3.11 представлена оправдываемость прогноза количества осадков в пункте прогноза.

Общая оправдываемость *P* по всей территории рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{N_{100} \cdot 100 + N_{50} \cdot 50 + N_0 \cdot 0}{N}, \qquad (3.12)$$

где N_{100} , N_{50} , N_0 – количество метеостанций, в которых прогноз оправдался на 100, 50 и 0% соответственно; N – общее количество метеостанций

Платиал		Фактическое количество осадков, мм							
прогноз	Без осадков	0,01–2	3–14	15–49	≥50				
	CAPE, Дж/кг								
<100	100	50	0	0	0				
101-1000	50	100	50	0	0				
1001-2500	0	50	100	50	0				
2501-3500	0	0	50	100	50				
>3500	0	0	0	50	100				
		CIN, Дэ	к/кг						
<-200	100	50	0	0	0				
-101200	50	100	50	0	0				
-51100	0	50	100	50	0				
-1650	0	0	50	100	50				
-150	0	0	0	50	100				
		LI, °C	2						
>3	100	50	0	0	0				
0,13	50	100	50	0	0				
-30	0	50	100	50	0				
-3,16	0	0	50	100	50				
<-6	0	0	0	50	100				

Оправдываемость прогноза количества осадков в пункте прогноза (%)

Таблица 3.11

Результаты расчета оправдываемости прогнозов количества осадков с помощью индексов неустойчивости представлены в табл. 3.12 и 3.13.

Как следует из табл. 3.12 и 3.13 оправдываемость прогноза осадков с помощью представленных индексов неустойчивости оказалась очень низкой независимо от заблаговременности прогноза, шага расчетной сетки и способа определения прогнозируемого количества осадков в пункте. Наименьшую Интерпретируя CIN. оправдываемость имеет индекс значения оправдываемости, можно сделать вывод о том, что фактически индекс CIN служит индикатором наличия или отсутствия В атмосфере ЛИШЬ задерживающих слоев. И если значения CIN указывают на отсутствие таких слоев, то можно лишь говорить о том, что возможно развитие конвекции и Ho формирование осадков. ИХ количество спрогнозировать будет затруднительно.

Далее была проведена оценка прогноза сильных осадков с помощью индексов неустойчивости САРЕ и LI. Прогноз индекса CIN ввиду низкой оправдываемости не рассматривался.

Таблица 3.12

Общая оправдываемость *P* (%) прогноза количества осадков в пункте прогноза для сетки с шагом 3 *км*

Способ измерения	Срок прогноза, ВСВ, ч	CAPE	CIN	LI
В точке расположения	3	41,7	1,8	22,0
метеостанции	15	41,2	1,4	19,2
Максимальное значение в	3	29,6	0,9	15,2
радиусе 50 км	15	28,9	1,2	10,9
Среднее значение в радиусе 50	3	40,8	1,6	22,2
КМ	15	40,5	1,3	19,1

Таблица 3.13

Общая оправдываемость прогноза *P* (%) количества осадков в пункте прогноза для сетки с шагом 9 *км*

Способ измерения	Срок прогноза, ВСВ, ч	CAPE	CIN	LI
В точке расположения	3	40,9	1,4	21,6
метеостанции	15	40,8	1,2	20,0
Максимальное значение в	3	32,1	0,9	16,1
радиусе 50 км	15	32,1	1,1	13,3
Среднее значение в радиусе	3	40,4	1,3	21,9
50 км	15	40,3	1,2	19,8

Для оценки прогнозов в рамках работы было принято, что при значениях CAPE >2500 Дж/кг и при значениях индекса LI < -3° C ожидается выпадение осадков $\geq 30 \text{ мм}/12 \text{ ч}$ (далее – сильные осадки).

Для расчета показателей успешности были составлены таблицы сопряженности, которые приведены в Приложении 4.

Результаты расчета показателей успешности представлены в табл. 3.14– 3.17.

Как следует из табл. 3.14–3.17 большая общая оправдываемость *U* наблюдается для прогнозов сильных осадков с помощью индекса САРЕ и в среднем превышает 85%. Оправдываемость по индексу LI не превышает 70%. В обоих случаях лучше всего прогноз оправдывается, если определять значения индекса либо в точке расположения метеостанции, либо рассчитывать среднее значение. С увеличение заблаговременности прогноза

значения оправдываемости либо остаются такие же, либо уменьшаются. Причем при изменении шага расчетной сетки значения меняются незначительно – в среднем на 2–3%.

Таблица 3.14

Показатель	В точке		Максимальное		Среднее	
	расположения		значение в		значение в	
успешности	метеостанции		радиусе 50 км		радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
<i>U</i> , %	90	89	73	71	89	89
$U_o, \%$	0	0	0	1	0	0
$U_{{\it eta} o},\%$	100	99	100	99	100	99
$\Pi_o, \%$	0	7	29	33	0	7
$\Pi_{ ilde{o}o}$, %	90	89	74	72	90	89
Т	-0,10	-0,04	0,02	0,05	-0,10	-0,04
Н	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
FAR	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00
GSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$U_o + \Pi_o, \%$	0	7	29	34	0	8
U _{бо} + П _{бо} , %	190	189	173	171	189	189

Показатели успешности прогноза сильных осадков с помощью индекса САРЕ разной заблаговременности для сетки с шагом 3 *км*

Таблица 3.15

Показатели успешности прогноза сильных осадков с помощью индекса САРЕ разной заблаговременности для сетки с шагом 9 км

Показатель	В точке		Максимальное		Среднее	
	расположения		значение в		значение в	
успешности	метеос	танции	анции радиусе 50 км		радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
<i>U</i> , %	88	88	77	78	88	88
$U_o, \%$	0	0	0	1	0	1
$U_{\mathrm{\textit{\textit{bo}}}},$ %	100	99	100	100	100	99
$\Pi_o, \%$	0	6	14	31	14	13
$\Pi_{ ilde{o}o}$, %	88	88	77	78	88	88
Т	-0,12	-0,06	-0,09	0,09	0,03	0,01
Н	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
FAR	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99
GSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$U_o + \Pi_o, \%$	0	7	14	32	15	13
$U_{\delta o}+\Pi_{\delta o},$ %	188	187	177	178	188	188

Такая сравнительно высокая общая оправдываемость получилась благодаря оправдываемости отсутствия выпадения сильных осадков $U_{\delta o}$, которая для обоих индексов достигает 100% независимо от заблаговременности прогноза, шага расчетной сетки и способа определения значений индексов. А вот оправдываемость наличия сильных осадков близка к нулю.

Таблица 3.16

Покоротони	В точке		Максимальное		Среднее	
Показатель	расположения		значение в		значение в	
успешности	метеостанции		радиусе 50 км		радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
<i>U</i> , %	66	58	47	39	67	57
$U_o, \%$	0	1	0	1	0	1
$U_{{\it o}o},\%$	100	100	100	100	100	100
$\Pi_o, \%$	14	69	63	81	43	56
$\Pi_{{\it {oo}}}$, %	66	58	47	38	67	57
Т	-0,19	0,27	0,10	0,20	0,10	0,13
Н	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
FAR	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99
GSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$U_o + \Pi_o, \%$	14	70	63	82	43	57
$U_{\delta o}+\Pi_{\delta o},$ %	166	157	147	138	167	157

Показатели успешности прогноза сильных осадков с помощью индекса LI разной заблаговременности для сетки с шагом 3 *км*

Таблица 3.17

Показатели успешности прогноза сильных осадков с помощью индекса LI разной заблаговременности для сетки с шагом 9 км

Показатони	В точке		Максимальное		Среднее	
	расположения		значение в		значение в	
успешности	метеостанции		радиусе 50 км		радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
<i>U</i> , %	61	53	44	37	62	54
$U_o, \%$	0	1	0	1	0	1
$U_{ar{o}o},\%$	100	100	100	100	100	100
$\Pi_o, \%$	29	69	63	81	43	63
$\Pi_{ ilde{o}o}$, %	61	53	44	37	62	54
Т	-0,10	0,22	0,07	0,18	0,05	0,16
Н	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
FAR	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99
GSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$U_o + \Pi_o, \%$	29	70	63	82	43	63
$U_{ ilde{o}o} + \Pi_{ ilde{o}o}, \%$	161	153	144	136	162	153

Предупрежденность выпадения сильных осадков Π_o или их отсутствия $\Pi_{\delta o}$ для индекса САРЕ имеет аналогичное распределение – высокие значения $\Pi_{\delta o}$ и низкие Π_o . Для индекса LI наблюдается немного другая ситуация.

Предупрежденность отсутствия сильных осадков ниже, чем для индекса САРЕ, но зато предупрежденность выпадения сильных осадков значительно выше. Причем для способа определения максимального значения она имеет большую величину, чем для других способов и достигает 80%. Следует отметить, что величина Π_o незначительно растет с увеличением заблаговременности, а $\Pi_{\delta o}$ уменьшается.

Значения показателей успешности *T*, *H*, *FAR* и *GSS* свидетельствуют о том, что прогноз сильных осадков с помощью обоих индексов неустойчивости является неудовлетворительным.

Суммарные показатели $U_o + \Pi_o$ и $U_{\delta o} + \Pi_{\delta o}$, показывают, что при прогнозе сильных осадков лучше всего работают способы определения индексов в точке расположения метеостанции и расчет среднего значение по узлам, попадающим в буферную зону метеостанции радиусом 50 *км*.

Проведенная оценка успешности модельных прогнозов позволяет сформулировать некоторые рекомендации по использованию модели WRF при прогнозе осадков разной интенсивности на практике. Выпадение или отсутствие осадков целесообразно определять с помощью метода по соотношению узлов сетки со значениями более и менее 0,1 *мм*/12 *ч*, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 *км*.

Для определения количества осадков можно использовать как метод определения в точке расположения пункта прогноза, так и метод расчета среднего значения по данным всех узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 *км*, которые показывают примерно одинаковую успешность. При этом если ожидается выпадение осадков, но пункт прогноза не попадает в зону осадков, то для определения количества осадков применяется метод среднего значения.

При прогнозе количества осадков также следует обращать внимание на зоны выпадения сильных осадков, расположенные в некоторой удаленности от пункта прогноза. В таком случае, индексы неустойчивости САРЕ и LI могут помочь сделать вывод о возможности выпадения сильных осадков в этих

пунктах. Проведенное исследование показало, что при значениях индекса CAPE < 2500 Дж/кг и при значениях индекса LI >--3°C вероятность выпадения сильных осадков значительно уменьшается. Причем для индекса LI отмечается более высокая надежность.

Подводя итоги исследования в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Качество прогноза осадков разной интенсивности моделью WRF можно считать удовлетворительным. Более точные прогнозы наличия или отсутствия осадков наблюдаются, если использовать метод по соотношению узлов сетки со значениями более и менее $0,1 \, mm/12 \, u$, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 κm . Для прогноза количества осадков можно использовать как метод определения в точке расположения пункта прогноза, так и метод расчета среднего значения по данным всех узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 κm . Прогноз сильных осадков следует считать, как не удовлетворительный. Для него характерны значительные пространственные и временные ошибки.

2. Анализ ошибок прогноза количества осадков показал, что модель WRF имеет тенденцию к завышению ожидаемого количества осадков. Причем величина ошибки тем больше, чем большее количество осадков прогнозируется.

3. В среднем качество прогнозов с увеличением заблаговременности снижается при расчете на сетке с шагом 3 κm . При увеличении шага расчетной сетки до 9 κm качество прогнозов с меньшей заблаговременностью ухудшается, а с увеличением заблаговременности наоборот, увеличивается. Исследование показало, что в целом использование расчетной сетки с шагом 3 κm не дает значительного улучшения качества прогноза осадков по сравнения с расчетной сеткой с шагом 9 κm , но при этом время счета модели при использовании более мелкой сетки увеличивается в несколько раз. Поэтому применение расчетной сетки с шагом 3 κm в данном случае не целесообразно.

4. Индексы неустойчивости, основанные на методе частицы, показывают низкие показатели успешности при прогнозе количества осадков. Также они не могут быть использованы в качестве основного метода для прогноза выпадения сильных осадков ввиду большого количества ложных тревог. Несмотря на это, исследование показало, что при значениях индекса САРЕ < 2500 Дж/кг и при значениях индекса LI >–3°C вероятность выпадения сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) значительно уменьшается.

5. Рассмотренные индексы можно использовать при составлении прогнозов выпадения осадков как дополнительный метод к основному, и в совокупности с другими индексами (например, основанными на температурно-влажностных характеристиках).

6. Успешность прогнозов с помощью индексов неустойчивости на основе расчетной сетки с шагом 3 *км* практически не улучшается по сравнению с прогнозами на расчётной сетке с шагом 9 *км*, а в некоторых случаях даже ухудшается. Поэтому составление прогноза на сетке с шагом 3 *км* с учетом значительного увеличения продолжительности счета модели при неизменных вычислительных ресурсах можно считать не целесообразным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты.

1. Анализ пространственно-временного распределения случаев очень сильных дождей и сильных ливней за 1979–2021 гг. позволил выявить тенденцию к увеличению числа случаев с ОЯ на рассматриваемом отрезке времени. Установлено, что рельеф территории Пермского края влияет на распределение повторяемости выпадения сильных осадков, которая возрастает с запада на восток и имеет максимальные значения у подножия Уральских гор.

2. Проведенный анализ осадкообразующих факторов позволил выявить благоприятные условия, которые способствуют формированию и выпадению сильных осадков на территории Пермского края. Было установлено, что в подавляющем большинстве случаев сильные дожди связаны с влиянием циклонов и их холодными фронтами, и фронтами окклюзии. Наибольшее число случаев сильных дождей в Пермском крае связано с влиянием южных циклонов. Наибольший вклад в формирование сильных дождей вносят циклоны в стадии заполнения, которые прослеживаются до изобарической поверхности 300 *гПа* и выше и имеют небольшие, компактные размеры.

3. Были изучены поля вертикальных движений и их зависимость от рельефа, которая наиболее ярко проявляется на изобарической поверхности 850 гПа. Наибольшая скорость восходящих потоков наблюдается при сильных осадках, образующихся на атмосферных фронтах. При этом разница между значениями скорости на разных фронтах незначительна. Интенсивность вертикальных движений зависит от стадии развития циклона, с которым связаны сильные осадки. Наибольшая скорость вертикальных движений наблюдается тогда, когда циклон находится в стадии молодого барического образования. Чем больше скорость восходящих потоков, максимум которой

обычно достигается на изобарической поверхности 700 гПа, тем продолжительнее осадки.

4. Сильные осадки, достигшие критерия ОЯ, имеют преимущественно ливневой и смешанный характер с продолжительностью выпадения от 4 до 6 и. Доля обложных осадков очень мала. Ливневые дожди чаще всего образуются на холодных фронтах и при внутримассовых процессах, а обложные и смешанные связаны преимущественно с фронтами окклюзии. При разных типах осадков наблюдаются различия в значениях индексов неустойчивости. Больше всего эта разница проявляется в индексах, характеризующих неустойчивость атмосферы, и в меньшей степени свойственна индексам, характеризующим условия увлажнения, ЧТО свидетельствует о том, что для образования сильных осадков ливневого, обложного и смешанного типа характерны практически одинаковые температурно-влажностные характеристики. Чем больше значения индексов неустойчивости, тем меньшая продолжительность осадков.

5. Качество прогноза осадков разной интенсивности моделью WRF можно считать удовлетворительным. В то же время прогноз сильных осадков, для которого характерны значительные пространственные и временные ошибки, следует считать неудовлетворительным. Анализ ошибок прогноза количества осадков показал, что модель WRF имеет тенденцию к завышению ожидаемого количества осадков. Причем величина ошибки тем больше, чем большее количество осадков прогнозируется.

6. В среднем качество прогнозов с увеличением заблаговременности снижается при расчете на сетке с шагом 3 км. При увеличении шага расчетной сетки до 9 км качество прогнозов с меньшей заблаговременностью ухудшается, а с большей заблаговременностью наоборот, увеличивается. Исследование показало, что в целом использование расчетной сетки с шагом 3 км не дает заметного улучшения качества прогноза осадков по сравнения с расчетной сеткой с шагом 9 км, но при этом время счета модели при

использовании более мелкой сетки увеличивается в несколько раз. Поэтому применение расчетной сетки с шагом 3 *км* в данном случае нецелесообразно.

7. Прогнозы осадков с применением индексов неустойчивости, основанных на методе частицы, дают низкие показатели успешности, поэтому они не могут быть использованы в качестве основного метода для прогноза. Однако, рассмотренные индексы неустойчивости могут использоваться в качестве дополнительных характеристик при оценке возможности выпадения сильных осадков в пункте прогноза. Как показало исследование, при значениях индекса CAPE < 2500 $Д ж/\kappa r$ и при значениях индекса LI >-3°C вероятность выпадения сильных осадков ($\geq 30 \ mm/12 \ y$) значительно уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев С.М., Ленская О.Ю., Гаязова А.О., Иванова О.Н., Носков А.А., Соболев Д.Н., Радченко Г.И. Алгоритмы краткосрочного прогноза с использованием радиолокационных данных: оценка трансляции и композиционный дисплей жизненного цикла // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2014. Т. 3. № 1. С. 17–32.

2. Алексеева А.А. Подходы к решению проблемы прогнозирования сильных летних осадков // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 64–84.

3. Алексеева А.А. Распознавание конвективных стихийных явлений погоды на основе цифровой информации с ИСЗ с целью их краткосрочного прогноза // Труды Гидрометцентра России. 2000. Вып. 335. С. 59–73.

4. Алексеева А.А. Условия формирования и краткосрочный прогноз сильных ливней и града на ЕТ СНГ: автореф. дисс. канд. геогр. наук. М., 1993. 27 с.

5. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 127–143.

6. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. № 351. С. 43–63.

7. Алексеева А.А., Лосев В.М., Багров А.Н. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях (от 11 до 34, от 35 до 49, 50 *мм*/12*ч* и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 39 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». 2012. С. 49–60.

8. Алексеева А.А., Лосев В.М., Песков Б.Е., Васильев Е.В., Никифорова А.Е. Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: ТРИАДА ЛТД, 2010. С. 147–159.

9. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135–148.

10. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Физико-синоптические предикторы, определяющие формирование сильных ливневых осадков // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3 (381). С. 24–43.

11. Аликина И.Я. Циркуляционные условия на Среднем и Южном Урале // Гидрология и метеорология. Пермь, 1971. Вып. 6. С. 115–122.

12. Аликина И.Я., Поспелова В.Ф., Строгина К.Ф., Уласевич А.Д. Перемещение барических образований из Арктического бассейна через Урал в весеннее время // Учен. зап. Перм. ун-та. Пермь, 1969. № 213. С. 20–35.

13. Багров А.Н. Результаты оперативных испытаний мезомасштабной модели COSMO-RU13 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2020. № 47. С. 3–21.

14. База данных опасных явлений Пермского края. URL: http://accidentbase.maps.psu.ru/ (дата обращения 15.08.2019).

15. Бакст Л.А., Федорова Н.Н. Анализ спутниковой информации в целях краткосрочного прогноза погоды на базе персональной ЭВМ // Исследование Земли из космоса. 1991. № 4. С. 83–86.

16. Бакст Л.А., Федорова Н.Н. Прогноз скорости участков циклонических облачных систем и фронтальных зон по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 1994. № 5. С. 3–8.

17. Бачурина А.А. Расчет количества и продолжительности обложных и ливневых осадков. Методические указания. Л.: Гидрометеоиздат, 1998. 31 с.

Богаткин О.Г. Авиационные прогнозы. 2-е изд., стереотипное. СПб.:
БХВ-Петербург. 2010. 288 с.

19. Ботыгин И.А., Шерстнёв В.С., Шерстнёва А.И. Программные средства построения мезомасштабных атмосферных моделей // Интернетжурнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 6 (31). С. 99.

20. Бухаров М.В., Алексеева А.А. Диагноз возможных ливней и града по измерениям уходящего теплового излучения Земли со спутника NOAA // Метеорология и гидрология. 2004. № 9. С. 21–30.

21. Быков А.В. Моделирование и прогноз опасных метеорологических явлений конвективного происхождения на Урале: диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2018. 151 с.

22. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 361. С. 101–119.

23. Быков А.В., Шихов А.Н. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 213–224.

24. Васильев А.А., Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Совместное использование численных мезомасштабных и концептуальных моделей при оперативном прогнозе опасных явлений погоды // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 359. С. 48–57.

25. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // Сб. статей «80 лет Гидрометцентру России». М. 2010. С. 94–135.

26. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по усвоению радиолокационной отражаемости в модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 5–19.

27. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30–44.

28. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18.

29. Вельтищев Н.Ф., Попова Т.П. Использование данных наблюдений со спутников в синоптическом анализе // Вопросы спутниковой метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. Вып. 4. 59 с.

30. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы.М.: Изд-во МГУ, 2006. 101 с.

31. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 5–17.

32. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» №2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 300–320.

33. Волкова Е.В., Косторная А.А., Амикишиева Р.А. Определение параметров облачного покрова системами автоматической обработки спутниковых данных // Географический вестник. 2020. № 3 (54). С. 124–134.

34. Волкова Е.В., Кухарский А.В. Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии METEOSAT MSG // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 43–62.

35. Волкова Е.В., Кухарский А.В., Санникова Г.В., Павлов И.Н. Валидация автоматизированной технологии диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра SEVIRI с

геостационарных метеоспутников серии METEOSAT MSG // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2021. № 48. С. 72–88.

36. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Детектирование облачности и выделение зон осадков регионального масштаба по данным полярноорбитальных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 28–38.

37. Волкова Е.В., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 7–26.

38. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 616 с.

39. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Солонин А.С. К вопросу о методике радиолокационного измерения интенсивности атмосферных осадков // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 27. С. 63–70.

40. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. 2017. М.: Росгидромет. 121 с.

41. Гидродинамико-статистический метод прогноза сильных летних осадков по ЕТР на основе выходных данных региональной модели гидрометцентра России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2014. № 41. С. 74-88.

42. Гидрометцентр России. Погода из первых рук. URL: https://meteoinfo.ru/glossary/14583-nowcasting-is (дата обращения 13.11.2018).

43. Глушкова Н.И. Некоторые результаты исследования по усовершенствованию диагноза и прогноза осадков по данным МРЛ // Труды Гидрометцентра СССР. 1980. Вып. 220. С. 77–83.

44. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.

45. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–37.

46. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности // Метеорология и гидрология. 2014. № 5. С. 40–53.

47. Дашко Н.А. Курс лекций по синоптической метеорологии, Ч. 1. Владивосток: ДВГУ, 2005. С. 262–295.

48. Дорофеев Е. В., Львова М. В., Попов И. Б., Тарабукин. И. А. (2014а). Применение критериев распознавания грозовых кучево-дождевых облаков в алгоритмах вторичной обработки радиолокационной информации, получаемой с помощью метеорадиолокаторов нового типа // Труды ГГО. Вып. 572. С.140–152.

49. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. Климатология. Л.: Гидрометеоиздат. 1989. 568 с.

50. Ермакова Л.Н. Краткосрочные прогнозы погоды: курс лекций. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. С. 65–82.

51. Ершова Т.В., Горбатенко В.П., Клипова О.А. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. № 7 (122). С. 9–14.

52. Жаков С.И. Общие закономерности режима тепла и увлажнения на территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат. 1982. 231 с.

53. Жукова В.А., Кошикова Т.С., Кужевская И.В. Оценка параметров мезомасштабных конвективных комплексов на основе спутниковых и аэрологических данных (Западная Сибирь) // Геосферные исследования. 2019. № 2. С. 86–97.

54. Жупанов В.Д., Лукьянов В.И., Васильев Е.В., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В., Скомсков А.Б. Экспериментальная технология численного сверхкраткосрочного прогноза погоды на основе негидростатической мезомасштабной метеорологической модели с усвоением радиолокационной информации и данных наземной наблюдательной сети // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 6–27.

55. Зайко П.О. Ассимиляция метеорологических данных в мезомасштабную численную модель WRF-ARW в Республике Беларусь // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 2020. № 3–2 (55). С. 4–12.

56. Зайко П.О. Технология усвоения данных доплеровского метеорологического локатора в мезомасштабную численную модель WRF-ARW в Республике Беларусь // Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века Материалы 19-й международной научной конференции. 2019. С. 314–317.

57. Зароченцев Г.А., Рубинштейн К.Г., Бычкова В.И., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И. Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 12. С. 981–987.

58. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат. 1977. 711 с.

59. Калинин Н.А., Сивков Б.А., Дмитриев А.В. Условия формирования ливневых осадков теплого периода в Пермском крае // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30. № 3. С. 295–306.

60. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Возможности метеорологических радиолокаторов в обнаружении облачности и опасных явлений погоды // Географический вестник. 2006. № 2 (4). С. 76–83.

61. Калинин Н.А., Толмачева Н.И. Комплексное использование дистанционных средств наземного и космического базирования для анализа условий погоды. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2003. 260 с.

62. Калинин Н.А., Толмачева Н.И. Космические методы исследований в метеорологии. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2005. 348 с.

63. Калинин Н.А., Фрик Л.В., Смирнова А.А. Исследование влияния рельефа Пермского края на распределение полей осадков // Географический вестник. 2008. № 2. С. 187–195.

64. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3 (373). С. 43–59.

65. Камалова Р.Г., Курбанова Л.А., Нигматуллина Р.Р. Особенности распределения случаев сильных дождей в равнинной и горной частях республики Башкортостан // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31. № 3. С. 311–318.

66. Канухина А.Ю. Исследование возможности прогноза конвективных явлений с помощью индексов конвекции, рассчитанных по результатам численной мезомасштабной модели // Ученые записки РГГМУ. 2006. № 2. С. 86–94.

67. Карлин Л.Н., Матвеев Л.Т. Об основных факторах образования атмосферных осадков // Ученые записки РГГМУ. 2006. № 2. С. 65–69.

68. Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков для теплого периода (май–сентябрь) 2016–2020 гг. По модели COSMO-RU2 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 43–51.

69. Кондове А.Л. Сравнение схем физических параметризаций в модели WRF // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 149–156.

70. Коротченко М.М., Воропай Н.Н. Влияние рельефа на распределение сумм атмосферных осадков на примере Тункинских Гольцов // Избранные труды Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск, 2020. С. 47–51.

71. Костарев С.В., Ветров А.Л. Качество прогноза осадков с помощью модели WRF-ARW с предварительным усвоением данных // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2018. Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Институт вычислительной математики РАН. 2018. С. 157–162.

72. Косторная А.А., Сапрыкин Е.И., Захватов М.Г., Токарева Ю.В. Метод дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2017. № 12. С. 16–24.

73. Кузьмина Р.Г., Чагин Г.Н. Атлас Пермской области. География. История. М.: ДиК, 1999. С. 2–4.

74. Кузнецова О.А. Эконометрика: практикум / О.А. Кузнецова, О.Н. Мазурмович. Самара: Изд-во Самарского университета. 2019. 72 с.

75. Кусков А.И. Циркуляционные условия формирования полей осадков теплого периода года на территории Томской области / А.И. Кусков. С.Г. Катаев. А.И. Комаров и др. // Вестник ТГПУ. Серия: Естественные и точные науки. 2006. Вып. 6 (57). С. 67–75.

76. Лаппо П.О., Красовский А.Н. Система усвоения данных в модель WRF-ARW в Гидромете Республики Беларусь // Сахаровские чтения 2017 года: экологические проблемы XXI века Материалы 17-й международной научной конференции: в 2-х частях. Под общей редакцией С.А. Маскевича, С.С. Позняка. 2017. С. 242–243.

77. Маддах М.А., Русин И.Н., Ахунд-Али А.М. Влияние пространственного разрешения на качество воспроизведения сильных осадков

в модели WRF–ARW: пример - юго-запад Ирана. Труды ГГО. 2018. № 588. С. 62–85.

78. Маддах М.А., Русин И.Н., Ахунд-Али А.М. Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на югозападе Ирана // Труды ГГО. 2017. Вып. 586. С. 191–204.

79. Марченко О.Ю., Мордвинов В.И., Антохин П.Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне реки Селенга // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1084–1090.

80. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 1984. 751 с.

81. Метеорологические ежемесячники. 1979–1989.

82. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидродинамических и гелиогеографических прогнозов. РД 52.27.284-91. // Л.: Гидрометеоиздат. 1991. 149 с.

83. Мостаманди С.В., Тарабукин И.А., Дорофеев Е.В. Развитие технологий сверхкраткосрочных и краткосрочных прогнозов опасных метеорологических явлений на основе анализа данных наблюдений и результатов численного прогноза гидродинамической модели WRF // Труды ГГО. 2015. № 579. С. 178–204.

84. Назаренко А.В. Опасные природные явления, ч. 3. Опасные явления погоды конвективного происхождения: учебно-методическое пособие для вузов; Воронежский гос. ун-т. Воронеж.: Издательско-полиграфический центр Воронежского гос. ун-та, 2008. 62 с.

85. Назаров Н.Н. География Пермского края. Ч. 1. Природная (физическая) география: учеб. пособие. 2-е изд., переработанное и дополненное. Пермь. Перм. гос. ун-т, 2011. С. 5–134.

86. Назаров Н.Н., Шарыгин М.Д. География. Пермская область. Пермь: Изд-во «Книжный мир», 1999. С. 7–53.
87. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3.Часть 1. Л.: Гидрометеоиздат. 1985. 301 с.

88. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724–2019. М.: Гидрометцентр России. 2019. 72 с.

89. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я. и др. Использование индексов конвективной неустойчивости и метеорологических величин для анализа смерчеопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 5–16.

90. Об утверждении и вводе в действие Перечня и критерий опасных гидрометеорологический явлений (ОЯ) по территории деятельности ФГБУ «Уральское УГМС»: приказ № П-01-2015/35-3 от 9 апреля 2015 г.

91. Орлова Е.М. Краткосрочный прогноз атмосферных осадков. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 168 с.

92. Переходцева Э.В. О гидродинамико-статистическом прогнозе до двух суток явлений сильного ветра и сильных осадков для территории Северного Кавказа // Труды Гидрометцентра России. 2012. № 347. С. 113–125.

93. Песков Б.Е., Алексеева А.А., Никифорова А.Е. Усовершенствование метода прогноза летних осадков развития // Метеорология и гидрология. 2008. № 10. С. 52–61.

94. Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г. Уточнение мезомасштабного численного прогноза сильных ливней развития // Метеорология и гидрология. 2010. № 9. С. 5–16.

95. Пищальникова Е.В. Условия формирования обильных снегопадов на территории Пермского края: диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. 177 с.

96. Погода и Климат. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/ (дата обращения 5.02.2021).

97. Расписание погоды. URL: https://rp5.ru (дата обращения 28.01.2021).

98. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических

радиолокаторов и искусственных спутников Земли. М.: Росгидромет, 1996. 180 с.

99. Решетов Г.Д. Прогноз дневных и ночных гроз // Труды Гидрометцентра СССР. 1977. Вып. 176. С. 86–99.

100. Решетов Г.Д. Метод прогноза дневных и ночных гроз с заблаговременностью 12–36 часов (Метод. указания для синоптиков АМСГ, АМЦ. ЗАМЦ и ГАМЦ) / Под ред. Н.П. Шакиной. М: Гидрометеоиздат. 1985. 18 с.

101. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д. и др. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-RU, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 37–53.

102. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Блинов Д.В. Технологическая линия системы краткосрочных прогнозов погоды COSMO-Ru с шагом сетки 7 км. // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 61–80.

103. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58–70.

104. Сивков Б.А. Вертикальные движения атмосферы как фактор образования сильных осадков в Пермском крае в теплый период года // В сборнике: Цифровая география. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. Пермь, 2020. С. 438–441.

105. Сивков Б.А. Особенности вертикальных движений атмосферы, при которых наблюдаются сильные осадки на территории Пермского края в теплый период года // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31. № 1. С. 88–96.

110

106. Сивков Б.А., Калинин Н.А. Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 83–95.

H.A. 107. Сивков Б.А.. Калинин Временная изменчивость И пространственное распределение сильных дождей в пермском крае за период 1979–2018 гг. // В сборнике: фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии, водном хозяйстве и геоэкологии. Материалы V научно-практической конференции (с международным Всероссийской участием), посвященной Международному Дню воды и Дню работника гидрометеорологической службы, и празднованию 75-летия Великой Победы. Уфа. 2020. С. 29–33.

108. Солдатенко С.А., Тертышников А.В., Ширшов Н.В. Оценка влияния спутниковой информации на качество численных прогнозов погоды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 38–47.

109. Стулов Е.А. Влияние мезомасштабных неоднородностей рельефа на поля фронтальных осадков // Метеорология и гидрология. 1994. № 3. С. 20–29.

110. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 5–32.

111. Травова С.В., Толстых М.А., Шашкин В.В. Оценка прогноза сильных осадков по данным оперативной глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 96–112.

112. Успин А.А., Успина Ф.Ф. Климат и опасные явления погоды на Урале. Екатеринбург: Банк культурной информации, 2004. 112 с.

113. Хргиан А.Х. О влиянии Уральского хребта на облачность и осадки // Метеорология и гидрология. 1961. № 3. С. 10–17.

114. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат. 1974. С. 145–473.

115. Цырульников М.Д., Гайфулин Д.Р., Успенский А.Б. Усвоение спутниковых радиационных наблюдений в задаче численного прогноза погоды // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли - RORSE 2018. Электронный сборник статей 16-й конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. 2018. С. 17–25.

116. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. Геофизика. Анализ изменений условий смерчегенеза в северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы. Доклады РАН. 2017, том 477, № 6. С. 722–727.

117. Шихов А.Н., Быков А.В. База данных об опасных и неблагоприятных явлениях погоды в Пермском крае как региональный аналог ESWD // Географический вестник. 2014. № 4 (31). С. 102–109.

118. Шишкин Н.С. Расчет интенсивности осадков из водяных облаков // Труды ГГО. Вып. 13 (75). 1948. С. 77–88.

119. Шкляев А.С., Балков В.А. Климат Пермской области. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1963. 189 с.

120. Шкляев В.А., Шкляева Л.С. Климатические ресурсы Уральского Прикамья // Географический вестник. Пермь, 2006. № 2. С. 76–90.

121. Шкляева Л.С. Перемещение циклонов и антициклонов над территорией Урала // Вопросы прогноза погоды, климата и циркуляции атмосферы: Межвуз. сб. науч. трудов. Перм. ун-т. Пермь, 1991. С. 3–9.

122. Щукин Г.Г., Булкин В.В., Первушин Р.В. Применение активных радиолокационных систем в мониторинге опасных метеорологических явлений // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн конспекты лекций. Научный совет РАН по распространению радиоволн Муромский институт (филиал); Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. 2017. С. 127–155.

112

123. Annadel Moral, TomeuRigo, Maria Carmen Llasat. A radar-based centroid tracking algorithm for severe weather surveillance: identifying split/merge processes in convective systems // Atmospheric Research Vol. 213, P. 110–120.

124. Carlos Munoz, Li-Pen Wang, Patrick Willems. Enhanced object-based tracking algorithm for convective rain storms and cells // Atmospheric Research. 2018. Vol. 201. P. 144–158.

125. Chan P.W., Hon K.K. Application of ground-based, multi-channel microwave radiometer in the nowcasting of intense convective weather through instability indices of the atmosphere // Meteorologische Zeitschrift, Vol. 20, No. 4. China, 2011. P. 432–433

126. Collier C.G., Illingworth A.J., Golding B.W. UWERN Report № 5: Quantitative precipitation forecasts // Eather. 2002. Vol. 57. N 2. P. 59–68.

127. Devendra Pradhan, De U. K., Singh U. V. Development of nowcasting technique and evaluation of convective indices for thunderstorm prediction in Gangetic West Bengal (India) using Doppler Weather Radar and upper air data // MAUSAM. 2012. Vol. 63 (2). P. 299–318.

128. Doswell C.A. and Shultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteorology. 2006. Vol. 1. No. 3. P. 1–22.

129. Han, L. 3D Convective Storm Identification, Tracking and Forecasting – An Enhanced TITAN Algorithm / L. Han, S. Fu, L. et al. // Oceanic Technol. 2009. Vol. 26. P. 719–732.

130. Henry N.L. A Static Stability Index for Low-Topped Convection. // Weather Forecasting. № 15. 2000. P. 246–254.

131. Hering. A, Senesi S., Ambrosetti P., Bernard-Bouissières I. Nowcasting thunderstorms in complex cases using radar data. WMO Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting, Toulouse, France, 2005.

132. Hoskins B. J. The mathematical theory of frontogenesis / B. J. Hoskins // Annual Review of Fluid Mechanics. 1982. Vol. 14. P. 131–151. 133. Johnson, J. T., P. L. MacKeen, A. Witt, E. D. Mitchell, G. J. Stumpf, M.D. Eilts, and K. W. Thomas. The storm cell identification and tracking algorithm:An enhanced WSR-88D algorithm // Wea. Forecasting.1998, Vol. 13. P. 263–276.

134. Jung T., Miller M.J., Palmer T.N. et al. High-resolution global climate simulations with the ECMWF model in Project Athena: Experimental design, model climate, and seasonal forecast skill // J. Climate. 2012. Vol. 25. No. 9. P. 3155–3172.

135. Jurgen Gracier. Convection parameters. – URL: http://www.juergengrieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf (дата обращения 03.02.2019).

136. Kowabata T., Seko H., Saito K., KurodaT., Tamiya K., Tsuyuki T., Honda Y., Wakazuki Y. An assimilation and forecasting experiment of the Nerima heavy rainfall with a cloudresolving nonhydrostatic 4-dimensional variational data assimilation system // J. Meteorol. Soc. Jap. 2007. Vol. 85. No. 3. P. 255–276.

137. Kuldeep Srivastava, RashmiBhardwaj. Real-time nowcast of a cloudburst and a thunderstorm event with assimilation of Doppler weather radar data // Natural Hazards. 2014. Vol. 70 (2). P. 1357–1383.

138. Ladehoff F. Evaluation of Selected Atmospheric Indices for the Prediction of Thunderstorms at Omaha, Nebraska. University of Nebraska-Lincoln, 1997. P. 8–20.

139. Llasat M. C., Rigo T., Ceperuelo M., Barrera A. Estimation of convective precipitation: the meteorological radar versus an automatic rain gauge network // Advances in Geosciences. 2005. Vol. 2. P. 103–109.

140. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central, Air Weather Service Tech. Rep. 200 (Rev.), Air Weather Service, Scott air Force Base, III, 1972. P. 23–42.

141. Novák P., Sokol Z. Use of Czech Weather Radar Network Data for precipitation estimating and nowcasting. Conference: World Environmental and Water Resources Congress 2008.

142. Papadopoulos A., Serpetzoglou E., Anagnostou E. Improving NWP through radar rainfall-driven land surface parameters: A case study on convective precipitation forecasting // Adv. Water Resour. 2008. Vol. 31, № 11. P. 1456–1469.

143. Peppier R.A. A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. Climate and meteorology section Illinois state water survey champaign, il 61820, 1988. P. 7–11.

144. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A baseline climatology of soundingderived supercell and tornado forecast parameters // Weather and Forecasting. 1998. No. 13. P. 1148–1164.

145. Richard E., Cosma S., Benoit R., Binder P., Buzzi A., Kaufmann P. Intercomparison of mesoscale meteorological models for precipitation forecasting // Hydrol. And Earth. Syst. Sci. 2003. Vol. 7. No. 6. P. 799–811.

146. Rigo T., Llasat M. C. Forecasting hailfall using parameters for convective cells identified by radar // Atmospheric Research. 2016. Vol. 169. P. 366–376.

147. Roy Bhowmik S. K., Soma Sen Roy, Kuldeep Srivastava. Processing of Indian Doppler Weather Radar data for mesoscale applications // Meteorology and Atmospheric Physics. 2011. Vol. 111. P. 133–147.

148. Skripnikova K., Řezáčová D. Radar-based hail detection // Atmospheric Research. 2014. Vol. 144. P. 175–185.

149. Sokol Z. Nowcasting of 1-h precipitation using radar and NWP data // Journal of Hydrology. 2006. Vol. 328. P. 200–211.

150. Soma Sen Roy, Lakshmanan V., Roy Bhowmik S. K., Thampi S. B. Doppler weather radar based nowcasting of cyclone Ogni // Journal of Earth System Science. 2010. Vol. 119. No. P. 183–199.

151. Steinheimer M., Haiden T. Improved nowcasting of precipitation based on convective analysis fields // Advances in Geosciences. 2007. Vol.10. P. 125–131.

152. Stephens G.L., L'Ecuyer T., Forbes R., Gettlemen A., Golaz J.C., Bodas-Salcedo A., Suzuki K., Gabriel Ph., Haynes J. Dreary state of precipitation in global models // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. No. 24. P. D 24211/1–D 24211/13. 153. Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A., Elmore K.L., and P. Markowski. Close procimity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle // Weather Forecasting. 2003. No. 18. P. 1243–1261.

154. Tuttle J.D, Foote G.B. Determination of the Boundary Layer Airflow from a Single Doppler Radar // J. Atmos. Ocean. Technol. 1990.Vol. 7. P. 218–232.

155. Wang-chun Woo, Wai-kin Wong. Operational Application of Optical Flow Techniques to Radar-Based Rainfall Nowcasting // Atmosphere. 2017. Vol. 8(3). P. 48.

156. Xiao Q., Kyo Ying-Hwa, Sun J., Lee Wen-Chau. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rain fale case // J. Appl. Meteorol. 2005. Vol. 44. No. 6. P. 768–788.

157. Xu J., Gao X., Xiao Q., Sorooshian S. Investigate the impacts of assimilating satellite rainfall estimates on rainstorm forecast over southwest United States // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. No. 16. P. 216104/1–216104/3.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
1979	•	•	1	1	
1980		1			
1981			2		
1982			2		
1983					
1984		1	1	1	
1985		1	1		
1986			1		
1987			1		
1988			1	1	
1989		1	2		
1990			2	2	
1991			3		
1992			3	4	
1993		2	4	1	
1994		1	1		
1995		5	2		
1996	1	3			
1997		1	1	4	
1998		1	3	1	
1999		1	2		
2000		2			
2001		2	1		
2002		1	2		2
2003		1	1		
2004			3	3	
2005		2	1		
2006					
2007		4	5		
2008				2	
2009				1	
2010				2	
2011				1	
2012		7	1		
2013		1	5		1
2014		1		1	
2015		3	2		
2016		1	2	2	1
2017		3	5		
2018		1	3		
2019			3	2	
2020	1		2		
2021		1	7	1	
Повторяемость, %	1	30	48	19	2

Внутригодовое распределение случаев ОЯ, связанных с очень сильными дождями и сильными ливнями в Пермском крае за 1979–2021 гг.

Метеостанция	Код	Широта	Долгота
1	2	3	4
Удмурт	ский ЦГМ	C –	
филиал ФГБУ «Ве	рхне-Волж	кское УГМ	C»
Ижевск	28411	56,83	53,45
Глазов	28214	58,13	52,58
Селты	28309	57,3	52,15
Можга	28409	56,43	52,2
Игра	28315	57,55	53,1
Воткинск	28318	57,05	53,92
Сарапул	28418	56,47	53,73
Дебесы	28312	57,63	53,82
Башки	рское УГМ	IC	
Уфа	28722	54,7	55,96
Чишмы	28721	54,56	55,38
Тукан	28823	53,86	57,41
Мелеуз	28925	52,95	55,97
Раевский	28710	54,08	54,92
Улу-теляк	28629	54,9	56,95
Верхнеяркеево	28613	55,43	54,33
Кананикольское	28926	52,78	57,46
Караидель	28526	55,83	56,91
Белорецк	28831	53,93	58,33
Учалы	28736	54,36	59,43
Дюртюли	28610	55,43	54,7
Сибай	28937	52,7	58,68
Акъяр	35037	51,87	58,18
Бирск	28621	55,42	55,53
Аскино	28522	56,08	56,58
Аксаково	28719	54,03	54,18
Архангельское	28726	54,4	56,8
Бакалы	28615	55,18	53,8
Буздяк	28713	54,55	54,53
Дуван	28537	55,7	57,9
Емаши	28535	55,93	58,61
Кумертау	28927	52,76	55,78
Федоровка	28826	53,16	55,18
Янаул	28419	56,27	54,9
Кушнаренково	28624	55,13	55,35
Мраково	28928	52,72	56,65
Зилаир	35026	52,22	57,40
Павловка	28622	55,41	56,45
Стерлитомак	28825	53,58	56,00
Туймазы	28712	54,58	53,73

Сведения о метеостанциях, данные которых были использованы для верификации модельных прогнозов осадков

Продолжение приложения 2

1	2	3	4
Vnau	ьское УГМ($\frac{1}{2}$	
Алапаевск	28248	57.87	61 7
Артемовский	28346	57,37	61.92
Атымья	23829	61.03	62 22
Бисерть	28432	56.88	59.07
Бурманторо	23827	61.28	60.47
Бурмантово	28455	56 72	63 77
Benyotyple	28433	58.87	60.78
Висим	28333	57.67	59 53
Бисим	28555	50.43	59,55 62,33
Гари Екоторицбирг	28049	56.92	60.63
Екатериноург	20440	57,65	62.07
ироит-фомина	28351	57,02	62,97
Каменск-уральский	28449	56,43	61,87
Камышлов	28451	56,85	62,72
Карпинск	28033	59,75	60,0
Качканар	28135	58,68	59,53
Красноуфимск	28434	56,65	57,78
Кушва	28233	58,32	59,75
Кытлым	28036	59,5	59,22
Липовское	28345	57,45	61,17
Михайловск	28438	56,43	59,08
Невьянск	28344	57,5	60,25
Нижний тагил	28240	57,88	60,07
Ревда	28430	56,88	59,98
Североуральск	23919	60,23	59,98
Серов	28044	59,6	60,53
Сысерть	28448	56,5	60,82
Таборы	28158	58,53	64,5
Тавда	28264	58,07	65,27
Тугулым	28359	57,07	64,67
Туринск	28255	58,05	63,68
Туринская слобода	28353	57,62	64,4
Шамары	28334	57,35	58,22
Челябинский ЦГМС – фи	лиал ФГБУ	«Уральско	е УГМС»
Аргаяш	28548	55,55	60,9
Бреды	35041	52,43	60,35
Бродокалмак	28549	55,58	62,07
Варна	28847	53,38	60,95
Верхнеуральск	28833	53,88	59,2
Верхний уфалей	28541	56,08	60,3
Златоуст	28630	55,17	59,67
Карталы	28941	53,05	60,67
Катав-ивановск	28639	54,77	58.22
Кизильское	28939	52,72	58.88
Магнитогорск	28838	53,35	59,08

Окончание приложения 2

1	2	3	4
Миасс	28647	55,0	60,08
Мирный	28741	54,55	60.3
Нязепетровск	28533	56.05	59.58
Октябрьское	28754	54.42	62.7
Троинк	28748	54.08	61.62
Челябинск	28645	55,15	61.3
Южноуральск	28745	54 43	61 35
		U WDOHLOW	
Патиаторо	<u>иал ФГДУ</u> 28457	<u>ски у ральски</u> 56.27	62.03
Далматово	20 4 57 28756	54 47	64.93
Учточи ин	20750	54,47	64.42
Куртамыш	28039	54,92	04,45
Леояжье	28002	55,28	66,5 (7.2
Макушино	28666	55,25	67,3
Памятное	28561	56,02	65,7
Петухово	28674	55,07	67,88
Половинное	28668	54,77	66,0
Целинное	28752	54,5	63,67
Шадринск	28552	56,07	63,65
Шатрово	28456	56,52	64,65
Шумиха	28655	55,23	63,32
Курган	28661	55,47	65,42
Пермский ЦГМС – фили	ал ФГБУ	«Уральское	е УГМС»
Б. Соснова	28313	57,68	54,6
Березники	28029	59,38	56,93
Бисер	28138	58,52	58,85
Вая	23913	60,6	58,38
Верещагино	28216	58,08	54,68
Гайны	23909	60,28	54,35
Губаха	28134	58,9	57.5
Лобрянка	28222	58,45	56.45
Коса	28013	59.95	55.0
Кочево	28016	59.6	54.47
Кулымкар	28116	59.02	54.65
Кунгур	28326	57.42	56,93
Кушур Кын	28238	57.83	58.65
Пысьра	28230	58 12	57 78
Нотовка	28234	57.08	54 75
Нироб	20010	60.73	5672
	23712	56 53	57.22
Окізорьский	20427 28221	50,55 57 77	55 42
Ovavor	20324 20221	51,21 57 70	55,45 55 20
	20321	51,12	<i>33,30</i> 56.22
Пермь	2025	38,U	JO,33
усть-черная	23903	00,47 5075	54,05
Чаиковскии	28413	50,/5	54,08
Чердынь	23914	60,4	56,52
Чермоз	28128	58,77	56,2
Чернушка	28428	56,5	56,13

Таблица 1

Таблицы сопряженности для прогнозов сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) на срок 3 ч ВСВ на сетке с шагом 3 км

Способ намарания	Прогнор	Наблю	Cuanto	
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	0	8	8
расположения	Без осадков	8	2696	2704
метеостанции	Сумма	8	2704	2712
Максимальное	Осадки	4	221	225
значение в	Без осадков	3	2460	2463
радиусе 50 км	Сумма	7	2681	2688
Среднее значение	Осадки	0	3	3
в радиусе 50 км	Без осадков	7	2678	2685
	Сумма	7	2681	2688

Таблица 2

Таблицы сопряженности для прогнозов сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) на срок 15 ч ВСВ на сетке с шагом 3 *км*

Способ намарания	Прогнор	Наблю	Cuanta	
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	0	19	19
расположения	Без осадков	15	2565	2580
метеостанции	Сумма	15	2584	2599
Максимальное	Осадки	8	422	430
значение в	Без осадков	5	2141	2146
радиусе 50 км	Сумма	13	2563	2576
Среднее значение	Осадки	0	3	3
в радиусе 50 км	Без осадков	13	2560	2573
	Сумма	13	2563	2576

Таблица 3

Таблицы сопряженности для прогнозов сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) на срок 3 ч ВСВ на сетке с шагом 9 км

Способ наморония	Прогнор	Наблю	Cuanto	
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	0	18	18
расположения	Без осадков	8	3022	3030
метеостанции	Сумма	8	3040	3048
Максимальное	Осадки	4	207	211
значение в	Без осадков	4	2833	2837
радиусе 50 км	Сумма	8	3040	3048
Среднее значение	Осадки	0	8	8
в радиусе 50 км	Без осадков	8	3032	3040
	Сумма	8	3040	3048

Таблица 4

Спороб изморания	Прогнор	Наблю	Cuanto	
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	0	25	25
расположения	Без осадков	16	2880	2896
метеостанции	Сумма	16	2905	2921
Максимальное	Осадки	4	341	345
значение в	Без осадков	12	2564	2576
радиусе 50 км	Сумма	16	2905	2921
Среднее значение	Осадки	0	8	8
в радиусе 50 км	Без осадков	16	2897	2913
	Сумма	16	2905	2921

Таблицы сопряженности для прогнозов сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) на срок 15 *ч* ВСВ на сетке с шагом 9 *км*

Таблица 1

Спороб изморация	Прогнор	Наблю	Наблюдалось		
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма	
В точке	Осадки	0	275	275	
расположения	Без осадков	7	2429	2436	
метеостанции	Сумма	7	2704	2711	
Максимальное	Осадки	2	701	703	
значение в	Без осадков	5	1955	1960	
радиусе 50 км	Сумма	7	2656	2663	
Среднее значение	Осадки	0	277	277	
в радиусе 50 км	Без осадков	7	2379	2386	
	Сумма	7	2656	2663	

Таблицы сопряженности для прогнозов осадков на срок 3 ч ВСВ по индексу САРЕ на сетке с шагом 3 км

Таблица 2

Таблицы сопряженности для прогнозов осадков на срок 15 ч ВСВ по индексу САРЕ на сетке с шагом 3 км

Снособ намарания	Прориор	Наблю	Cuanta	
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	1	276	277
расположения	Без осадков	14	2308	2322
метеостанции	Сумма	15	2584	2599
Максимальное	Осадки	5	720	725
значение в	Без осадков	10	1818	1828
радиусе 50 км	Сумма	15	2538	2553
Среднее значение	Осадки	1	273	274
в радиусе 50 км	Без осадков	13	2266	2279
	Сумма	14	2539	2553

Таблица 3

Таблицы сопряженности для прогнозов осадков на срок 3 ч ВСВ по индексу LI на сетке с шагом 3 км

Способ измерения	Прогноз	Наблю	Cuanto	
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	1	1025	1026
расположения	Без осадков	6	2015	2021
метеостанции	Сумма	7	3040	3047
Максимальное	Осадки	5	1611	1616
значение в	Без осадков	2	1429	1431
радиусе 50 км	Сумма	7	3040	3047
Среднее значение	Осадки	3	991	994
в радиусе 50 км	Без осадков	4	2049	2053
	Сумма	7	3040	3047

Таблица 4

Способ наморания	Прориор	Наблк	Наблюдалось	
Спосоо измерения	прогноз	Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	11	1226	1237
расположения	Без осадков	5	1679	1684
метеостанции	Сумма	16	2905	2921
Максимальное	Осадки	13	1790	1803
значение в	Без осадков	3	1115	1118
радиусе 50 км	Сумма	16	2905	2921
Среднее значение	Осадки	9	1246	1255
в радиусе 50 км	Без осадков	7	1659	1666
	Сумма	16	2905	2921

Таблицы сопряженности для прогнозов осадков на срок 15 ч ВСВ по индексу LI на сетке с шагом 3 км

Таблица 5

Таблицы сопряженности для прогнозов осадков на срок 3 ч ВСВ по индексу САРЕ на сетке с шагом 9 км

Способ измерения	Прогноз	Наблюдалось		Cuaqua
		Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	0	353	353
расположения	Без осадков	7	2687	2694
метеостанции	Сумма	7	3040	3047
Максимальное	Осадки	1	695	696
значение в	Без осадков	6	2345	2351
радиусе 50 км	Сумма	7	3040	3047
Среднее значение	Осадки	1	355	356
в радиусе 50 км	Без осадков	6	2685	2691
	Сумма	7	3040	3047

Таблица 6

Таблицы сопряженности для прогнозов осадков на срок 15 ч ВСВ по индексу САРЕ на сетке с шагом 9 км

Способ измерения	Прогноз	Наблюдалось		Cunara
		Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	1	349	350
расположения	Без осадков	15	2556	2571
метеостанции	Сумма	16	2905	2921
Максимальное	Осадки	5	636	641
значение в	Без осадков	11	2269	2280
радиусе 50 км	Сумма	16	2905	2921
Среднее значение	Осадки	2	343	345
в радиусе 50 км	Без осадков	14	2562	2576
	Сумма	16	2905	2921

Таблица 7

Сполоб изморания	Прогноз	Наблюдалось		Cunara
Спосоо измерения		Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	2	1187	1189
расположения	Без осадков	5	1853	1858
метеостанции	Сумма	7	3040	3047
Максимальное	Осадки	5	1693	1698
значение в	Без осадков	2	1347	1349
радиусе 50 км	Сумма	7	3040	3047
Среднее значение	Осадки	3	1152	1155
в радиусе 50 км	Без осадков	4	1888	1892
	Сумма	7	3040	3047

Таблицы сопряженности для прогнозов осадков на срок 3 ч ВСВ по индексу LI на сетке с шагом 9 км

Таблица 8

Таблицы сопряженности для прогнозов осадков на срок 15 ч ВСВ по индексу LI на сетке с шагом 9 км

Способ измерения	Прогноз	Наблюдалось		Curace
		Осадки	Без осадков	Сумма
В точке	Осадки	11	1355	1366
расположения	Без осадков	5	1550	1555
метеостанции	Сумма	16	2905	2921
Максимальное	Осадки	13	1840	1853
значение в	Без осадков	3	1065	1068
радиусе 50 км	Сумма	16	2905	2921
Среднее значение	Осадки	10	1342	1352
в радиусе 50 км	Без осадков	6	1563	1569
	Сумма	16	2905	2921