

На правах рукописи



Сивков Богдан Алексеевич

**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ  
ОСАДКОВ ТЕПЛОГО ПЕРИОДА  
НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ**

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

**Научный руководитель:** **Калинин Николай Александрович**,  
доктор географических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Шерстюков Борис Георгиевич**, доктор географических наук, заведующий лабораторией исследования последствий изменения климата Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации-Мирового центра данных (г. Обнинск)

**Гурьянов Владимир Владимирович**, кандидат географических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы (г. Казань)

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск)

Защита состоится 28 апреля 2022 г. в 13.30 на заседании диссертационного совета Д 212.189.10 при ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, email: meteo@psu.ru, факс (342)239-63-54.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеки Пермского государственного национального исследовательского университета.

Электронная версия текста диссертации и автореферата доступна на сайте ПГНИУ по адресу: <http://www.psu.ru> и официальном сайте ВАК РФ.

Ваш отзыв об автореферате просим направить по адресу: 614990, г. Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15, ПГНИУ, диссертационный совет Д 212.189.10. Ученому секретарю Балиной Т.А., e-mail: seg@psu.ru.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » марта 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат географических наук,  
доцент



Татьяна Анатольевна Балина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одним из опасных явлений погоды (ОЯ) в теплое время года является выпадение очень сильных дождей и сильных ливней.

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 на Урале и, в частности, в Пермском крае, изучались еще в конце XX столетия, такими учеными как Аликина И.Я., Поспелова В.Ф., Шкляев В.А., Шкляева Л.С., Успин А.А., Успина Ф.Ф. и др. 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 было установлено, 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 настоящее время 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 «Наставлением по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения» и «Методическими указаниями по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидродинамических и гелиогеографических прогнозов» (РД 52.27.284-91).

**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.

**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.

2. 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.

## ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**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.**

Всего за период 1979–2021 гг. метеостанциями Пермского края был зарегистрирован 161 случай наступления 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).

Самые ранние случаи сильных дождей были зафиксированы в мае, а самые поздние в сентябре. Основная доля зарегистрированных опасных явлений приходится на летние месяцы. 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. Сглаживание проводилось методом скользящего среднего с периодом осреднения 5 лет. На основе получившегося графика были также построены линейный и полиномиальный тренды (рис. 1).

Как следует из рис. 1, в период с 1979 по 2021 гг. наблюдается плавное увеличение повторяемости случаев с осадками в градации ОЯ. Оценка значимости уравнения регрессии с использованием F-критерия Фишера, показала, что уравнение имеет статистическую значимость ( $F_{\text{факт}} = 27,89 > F_{\text{табл}} = 4,11$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ ). Средняя ошибка аппроксимации при этом составила 26,1%, что в рамках данной задачи можно считать удовлетворительным результатом.

Построение на графике линии тренда в виде полиномиальной функции пятой степени позволяет увидеть некоторую периодичность в распределении сильных дождей в исследуемом временном отрезке (рис. 1). 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 продол-

жительность, 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.

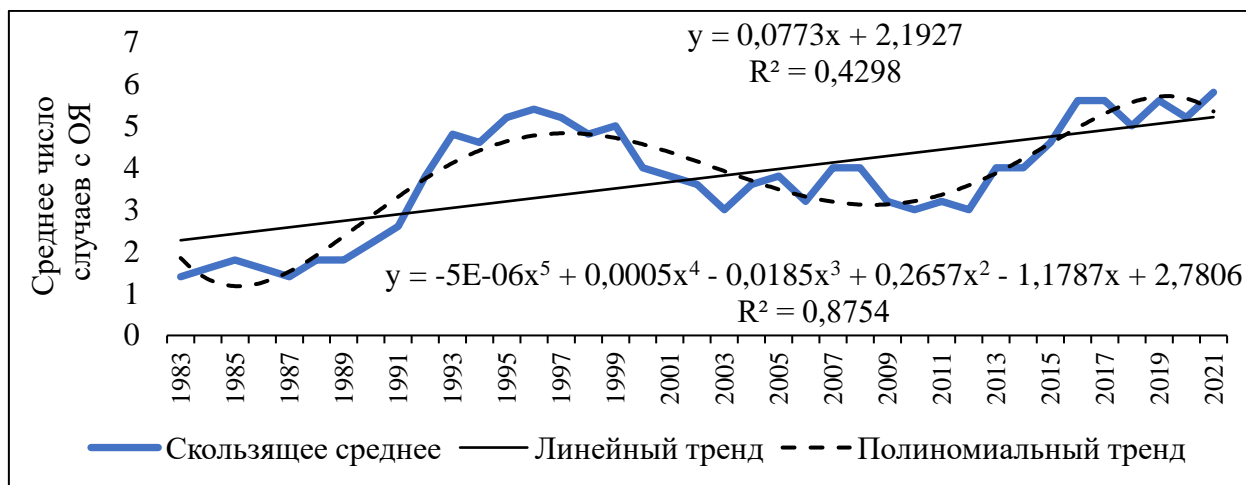


Рис. 1. Распределение сильных дождей по годам за 1979–2021 гг.

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. При этом, в 57% случаев сильные дожди наблюдались в дневное время, остальные 43% — в ночное.

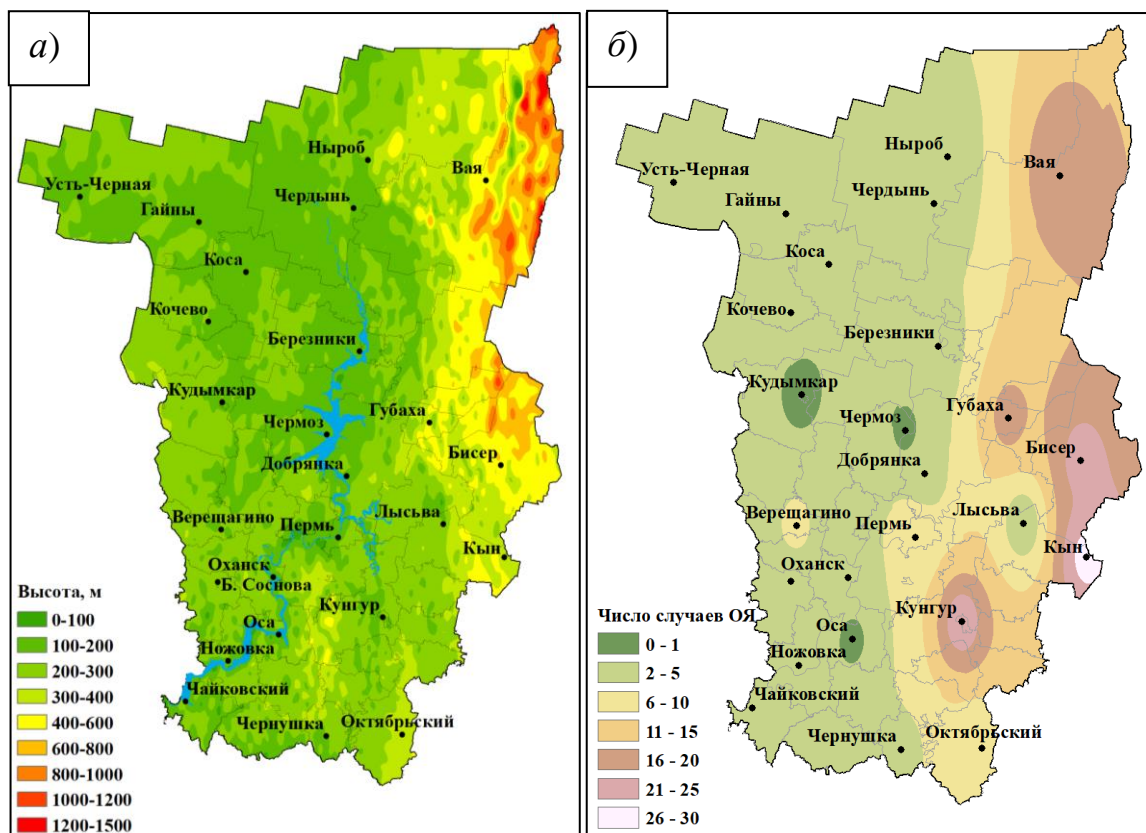
Распределение случаев с сильными дождями по территории Пермского края имеет некоторые особенности, связанные с географическим положением и рельефом. В западной части Пермского края (80% территории) преобладает низменный и равнинный рельеф. На востоке расположились Уральские горы, высота которых в Пермском крае изменяется от 600 до 1500 м (рис. 2а).

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.

На рис. 2б представлено распределение суммарного числа случаев с ОЯ в виде очень сильных дождей и сильных ливней по территории Пермского края, которое носит ярко выраженный меридиональный характер. Повторяемость числа случаев возрастает в направлении с запада на восток. Такое распределение можно объяснить тем, в Пермском крае в ливнеопасных районах располагаются 5 из 25 метеостанций: Вая, Губаха, Бисер, Кунгур и Кын. 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.



**Рис. 2. Физическая карта Пермского края (а); пространственное распределение случаев ОЯ в виде очень сильных дождей и сильных ливней по территории Пермского края (б).**

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.

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

Всего за период с мая по сентябрь 1979–2021 гг. метеостанциями Пермского края был зарегистрирован 161 случай наступления ОЯ в виде очень сильных дождей и сильных ливней. Однако, 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.

Синоптическая ситуация и 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 давления, 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.

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.

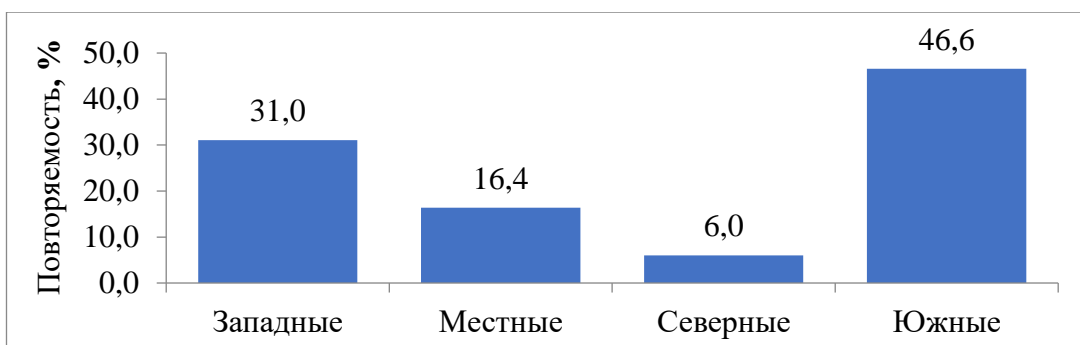
По району возникновения циклоны были разделены на четыре типа: «южные» (южные и юго-западные циклоны), «западные» (западные и северо-западные циклоны), «северные» и «местные». В рамках данного исследования южными называются циклоны, возникшие в районе Каспийского и Черного морей и над Северным Казахстаном. 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 местных циклонов связано с волновыми возмущениями на малоподвижных фронтах, а не с термическим фактором.

Распределение числа случаев сильных дождей в зависимости от района возникновения циклонов представлено на рис. 3, 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 край 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.

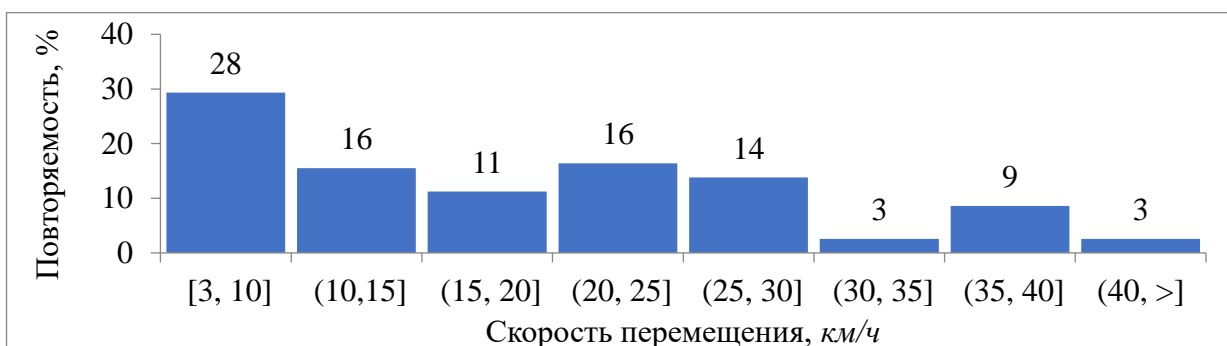
Скорость перемещения циклонов, при которых наблюдались сильные дожди, изменялась от 3 до 55 км/ч. Среднее значение составило 19 км/ч.

Наибольшее число случаев сильных дождей связано со стационарными (скорость менее 5 км/ч) и малоподвижными циклонами (скорость 5–10 км/ч), доля которых составляет 28% (рис. 4). Высокая повторяемость по сравнению с другими градациями скорости, обусловлена непосредственно низкой скоростью перемещения таких циклонов. Они долго располагаются над одной и той

же территорией, что способствует выпадению большего количества осадков за промежуток времени, в течении которого проводятся измерения.

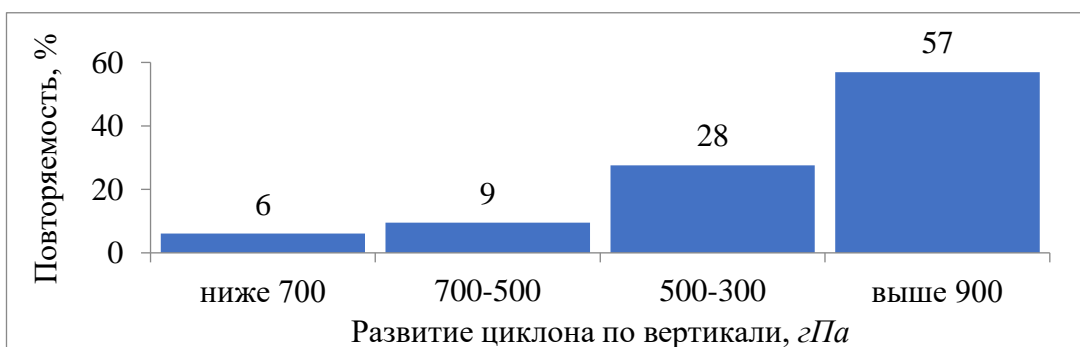


**Рис. 3. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от области возникновения циклонов.**



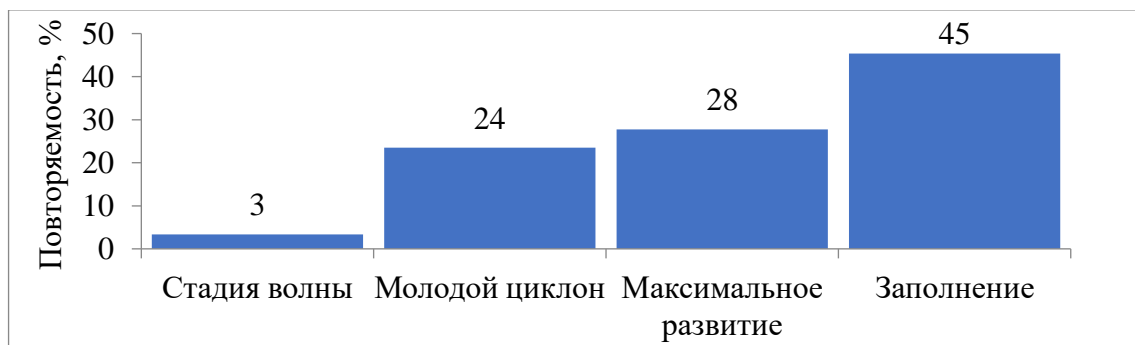
**Рис. 4. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от скорости перемещения циклонов.**

Также преобладание низкой скорости обусловлено вертикальным развитием циклонических систем. Как следует из рис. 5, более половины случаев сильных дождей (57%) связаны с хорошо развитыми по вертикали циклонами, которые прослеживаются до изобарической поверхности 300 гПа и более. Такие циклоны являются малоподвижными барическими образованиями с квазивертикальной высотной осью.



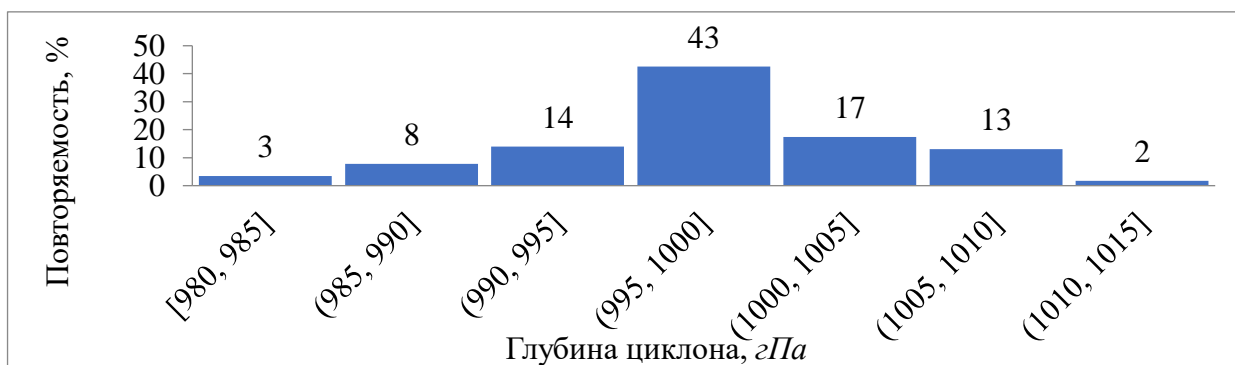
**Рис. 5. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от развития циклонов по вертикали.**

В свою очередь, большая повторяемость случаев ОЯ, связанных с высокими циклонами обусловлена их эволюцией. Наибольшее число случаев (45%) сильных дождей наблюдается в циклонах, находящихся на стадии заполнения (рис. 6). Как правило, заполняющиеся циклоны являются высокими малоподвижными барическими образованиями, что приводит к выпадению обильного количества осадков над одной территорией.



**Рис. 6. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от стадии развития циклонов.**

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. Чаще всего сильные дожди связаны с циклонами, у которых давление в центре равняется или близко среднему (рис.7).



**Рис. 7. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от глубины циклонов (гПа).**

Кроме характеристик циклонов также были рассмотрены и связанные с ним фронтальные системы.

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%).

Таким образом, наиболее благоприятной ситуацией для выпадения осадков в градации ОЯ является влияние на Пермский край фронта окклюзии, связанного с «южными» высокими, малоподвижными заполняющимися циклонами.

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

В настоящей работе для прогноза осадков использовалась модель WRF-ARW. В качестве начальных данных и граничных условий были использованы результаты расчетов глобальной модели GFS с шагом сетки  $0,25^\circ$  и шагом по времени 1 ч. Запуск счета модели WRF начинался от 0 ч всемирного скоординированного времени (BCV) текущих суток. Первые 12 ч расчетов прогностические данные модели GFS заменялись данными объективного анализа, т.е. проводилась процедура предварительного усвоения данных, которая фактически является анализом наблюдаемых полей метеорологических величин. Таким образом, прогноз начинает считаться от срока 12 BCV, 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  $333 \times 333$ , а вложенная – 3 км с количеством узлов  $400 \times 400$ . Временной шаг вывода данных составил 1 ч, с выдачей полей метеовеличин на двух сетках.

Оценка качества прогноза осадков летнего периода моделью WRF проводилась согласно методики описанной в РД 52.27.284-91. По данным таблицы сопряженности были рассчитаны следующие показатели успешности прогноза факта наличия (отсутствия) осадков: общая оправдываемость прогноза  $U$ , оправдываемость прогноза наличия осадков  $U_o$  (отсутствия осадков  $U_{\bar{o}}$ ), предупреденность прогноза наличия  $P_o$  (отсутствия  $P_{\bar{o}}$ ) осадков, критерий Пирса-Обухова  $T$  (при идеальном прогнозе  $T = 1$ , при абсолютно некорректном прогнозе  $T = -1$ ), сумма  $U_o + P_o$  и  $U_{\bar{o}} + P_{\bar{o}}$  (значения более 130% свидетельствует об удовлетворительном качестве прогноза), критерий надежности Н.А. Багрова  $H$  (чем выше значения  $H$ , тем лучше качество прогноза), показатель ложных тревог  $FAR$  (лучший результат соответствует  $FAR = 0$ , а наихудший отмечается при  $FAR = 1$ ), показатель  $GSS$  (при  $GSS = 0$  результат моделирования осадков считается случайным, идеальным прогноз осадков считается, когда  $GSS = 1$ ).

Для оценки точности прогноза количества осадков рассчитывались средняя абсолютная ошибка прогноза  $\delta Q$  и средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза  $\delta$ .

Верификация прогноза модели WRF проводилась на основе данных измерений полусуточных сумм осадков в июле 2020 г. на метеостанциях, расположенных на территориях Пермского края, Свердловской, Челябинской, Курганской областях, республиках Удмуртия и Башкортостан (всего 127 метеостанций).

Выпадение или отсутствие осадков на метеостанции определялось 4 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; 4) по соотношению узлов сетки (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).

Прогностическое количество осадков на метеостанции определялось по первым трем вышеперечисленным методам.

Составленные таблицы сопряженности на сроки 3 и 15 ч ВСВ для сетки с шагом 3 км представлены в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Таблицы сопряженности для прогнозов на срок 3/15 ч ВСВ на сетке с шагом 3 км**

Способ измерения	Прогноз	Наблюдалось		Сумма
		Осадки	Без осадков	
В точке расположения метеостанции	Осадки	429/678	310/591	739/1269
	Без осадков	206/111	1767/1216	1973/1327
	Сумма	635/789	2077/1807	2712/2596
Максимальное значение в радиусе 50 км	Осадки	621/778	1332/1474	1953/2252
	Без осадков	9/6	726/314	735/320
	Сумма	630/784	2058/1788	2688/2572
Среднее значение в радиусе 50 км	Осадки	579/750	707/1131	1286/1881
	Без осадков	51/35	1351/657	1402/691
	Сумма	630/784	2058/1788	2688/2572
По соотношению узлов сетки	Осадки	427/702	251/592	678/1294
	Без осадков	203/82	1807/1196	2010/1278
	Сумма	630/784	2058/1788	2688/2572

По данным таблиц сопряженности были рассчитаны показатели успешности модельных прогнозов осадков с разной заблаговременностью, которые были рассчитаны на сетке с шагом 3 и 9 км. Результаты расчета представлены в табл. 2.

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.

При рассмотрении оправдываемости наличия  $U_o$  и отсутствия  $U_{\bar{o}}$  осадков было выявлено, что модель WRF лучше прогнозирует отсутствие осадков, чем их наличие. Оправдываемость отсутствия осадков изменялась от 90 до 99%, а оправдываемость наличия осадков  $U_o$  от 32 до 63%.

В целом, анализ показателей успешности показывает, что наибольшую практическую значимость, при прогнозе выпадения или отсутствия осадков

имеет способ по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции. Для них характерны более высокие значения критерия надежности Н.А. Багрова, показателя  $GSS$  и меньшее количество ложных тревог.

Таблица 2

Показатели успешности модельных прогнозов разной заблаговременности, полученные на сетке с шагом 3/9 км

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 км		По соотношению узлов сетки	
	3	15	3	15	3	15	3	15
$U$ , %	81/77	73/75	50/51	42/52	72/69	55/65	<b>83/82</b>	<b>74/79</b>
$U_o$ , %	58/49	53/54	32/31	35/37	45/41	40/45	<b>63/59</b>	<b>54/60</b>
$U_{\bar{o}}$ , %	90/91	92/92	<b>99/98</b>	<b>98/98</b>	96/96	95/97	90/90	94/92
$P_o$ , %	68/73	86/84	<b>99/97</b>	<b>99/98</b>	92/91	96/96	68/68	90/83
$P_{\bar{o}}$ , %	85/78	67/71	35/38	18/34	66/63	37/53	<b>88/86</b>	<b>67/78</b>
$T$	0,53/0,51	0,53/0,55	0,34/0,35	0,17/0,32	<b>0,58/0,54</b>	0,32/0,49	0,56/0,54	<b>0,56/0,61</b>
$H$	0,50/0,43	0,45/0,47	0,20/0,20	0,11/0,21	0,42/0,38	0,23/0,36	<b>0,54/0,51</b>	<b>0,48/0,55</b>
$FAR$	0,42/0,51	0,47/0,47	0,68/0,69	0,65/0,63	0,55/0,59	0,60/0,55	<b>0,37/0,41</b>	<b>0,46/0,40</b>
$GSS$	0,33/0,28	0,29/0,31	0,11/0,11	0,06/0,12	0,27/0,23	0,13/0,22	<b>0,37/0,35</b>	<b>0,31/0,38</b>
$U_o+P_o$ , %	126/122	139/138	130/128	134/135	<b>137/132</b>	136/141	131/127	<b>144/143</b>
$U_{\bar{o}}+P_{\bar{o}}$ , %	175/169	159/163	134/136	116/132	162/159	132/150	<b>178/176</b>	<b>160/170</b>
$\delta$ , мм	<b>0,2/0,5</b>	<b>0,7/0,7</b>	7,5/6,2	13,7/9,7	0,3/0,5	0,7/0,7	–	–
$\delta Q$ , мм	1,4/1,6	2,5/2,4	7,7/6,5	14,0/10,1	<b>1,3/1,4</b>	<b>2,3/2,2</b>	–	–

Распределение как средней абсолютной ошибки  $\delta Q$ , так и систематической ошибки  $\delta$  по способам определения количества осадков одинаково. Наибольшие значения ошибок характерны для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 км. 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.

С ростом заблаговременности значения практически всех показателей успешности уменьшаются.

Распределение значений показателей успешности по способам определения осадков при использовании для прогноза шага сетки 9 км имеет такой же характер, как и при использовании сетки с шагом 3 км. Однако их величина немного различается.

При увеличении шага сетки наблюдается тенденция, когда качество прогноза на срок 3 ВСВ немного снижается, а на срок 15 ВСВ, наоборот увеличивается. Величина изменения в целом не значительна и составляет в среднем 5–6%.

Таким образом, качество прогноза осадков разной интенсивности моделью WRF можно считать удовлетворительным. Однако модель WRF имеет тенденцию к завышению ожидаемого количества осадков.

Исследование показало, что в целом использование расчетной сетки с шагом 3 км не дает значительного улучшения качества прогноза осадков по сравнению 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 не целесообразно.

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

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: CAPE, CIN, LI. 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.

Оценка успешности прогноза осадков с помощью индексов неустойчивости была проведена на основе методики из «Наставления по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения», только вместо прогностических градаций количества осадков были использованы прогностические градации значений индексов неустойчивости. Результаты расчета общей оправдываемости представлены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, 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 оправдываемость имеет индекс CIN. Интерпретируя значения оправдываемости, можно сделать вывод о том, что фактически индекс CIN служит лишь индикатором наличия или отсутствия в атмосфере задерживающих слоев. И если значения CIN указывают на отсутствие таких слоев, то можно лишь говорить о том, что возможно развитие конвекции и формирование осадков. Но их количество спрогнозировать будет затруднительно.

**Таблица 3**

**Общая оправдываемость  $P$  (%) прогноза количества осадков в пункте прогноза для сетки с шагом 3/9 км**

Способ измерения	Срок прогноза, ВСВ, ч	CAPE	CIN	LI
В точке расположения метеостанции	3	41,7/40,9	1,8/1,4	22,0/21,6
	15	41,2/40,8	1,4/1,2	19,2/20,0
Максимальное значение в радиусе 50 км	3	29,6/32,1	0,9/0,9	15,2/16,1
	15	28,9/32,1	1,2/1,1	10,9/13,3
Среднее значение в радиусе 50 км	3	40,8/40,4	1,6/1,3	22,2/21,9
	15	40,5/40,3	1,3/1,2	19,1/19,8



Также была проведена оценка прогноза сильных осадков с помощью индексов неустойчивости CAPE и LI (табл. 4 и 5), согласно методике РД 52.27.284-91. Прогноз по индексу CIN ввиду низкой оправдываемости не рассматривался

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  $\geq 30$  мм/12 ч (далее – сильные осадки).

**Таблица 4**

**Показатели успешности прогноза сильных осадков с помощью индекса CAPE  
разной заблаговременности для сетки с шагом 3/9 км**

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
$U$ , %	90/88	89/88	73/77	71/78	89/88	89/88
$U_o$ , %	0/0	0/0	0/0	1/1	0/0	0/1
$U_{\bar{o}}$ , %	100/100	99/99	100/100	99/100	100/100	99/99
$P_o$ , %	0/0	7/6	29/14	33/31	0/14	7/13
$P_{\bar{o}}$ , %	90/88	89/88	74/77	72/78	90/88	89/88
$T$	-0,10/-0,12	-0,04/-0,06	0,02/-0,09	0,05/0,09	-0,10/0,03	-0,04/0,01
$H$	-0,01/0,00	0,00/-0,01	0,0/0,0	0,0/0,0	-0,01/0,00	0,0/0,0
$FAR$	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	0,99/0,99	1,0/1,0	1,00/0,99
$GSS$	0,00	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0
$U_o + P_o$ , %	0/0	7/7	29/14	32	0/15	8/13
$U_{\bar{o}} + P_{\bar{o}}$ , %	190/188	189/187	173/177	171/178	189/188	189/188

Как следует из табл. 4 и 5, большая общая оправдываемость  $U$  наблюдается для прогнозов сильных осадков с помощью индекса CAPE 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 увеличением заблаговременности прогноза значения оправдываемости либо остаются такие же, либо уменьшаются. Причем при изменении шага расчетной сетки значения меняются незначительно – в среднем на 2–3%

Такая сравнительно высокая общая оправдываемость получилась благодаря оправдываемости отсутствия выпадения сильных осадков  $U_{\bar{o}}$ , 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. Предупрежденность выпадения сильных осадков  $P_o$  или их отсутствия  $P_{\bar{o}}$  для индекса CAPE имеет аналогичное распределение – высокие значения  $P_{\bar{o}}$  и низкие  $P_o$ . Для индекса LI наблюдается немного другая ситуация. Предупрежденность отсутствия сильных осадков ниже, чем для индекса CAPE, 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  $P_o$  незначительно растет с увеличением заблаговременности, а  $P_{\bar{o}}$  уменьшается.

Таблица 5

**Показатели успешности прогноза сильных осадков с помощью индекса LI  
разной заблаговременности для сетки с шагом 3/9 км**

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
$U$ , %	66/61	58/53	47/44	39/37	67/62	57/54
$U_o$ , %	0/0	1/1	0/0	1/1	0/0	1/1
$U_{\bar{o}o}$ , %	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
$P_o$ , %	14/29	69/69	63/63	81/81	43/43	56/63
$P_{\bar{o}o}$ , %	66/61	58/69	47/44	38/37	67/62	57/54
$T$	-0,19/-0,10	0,27/0,22	0,10/0,07	0,20/0,18	0,10/0,05	0,13/0,16
$H$	0,0/0,0	0,01/0,01	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0
$FAR$	1,0/1,0	0,99/0,99	1,0/1,0	0,99/0,99	1,0/1,0	0,99/0,99
$GSS$	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0
$U_o + P_o$ , %	14/29	70/70	63/63	82/82	43/43	57/63
$U_{\bar{o}o} + P_{\bar{o}o}$ , %	166/161	157/153	147/144	136	167/162	153

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

Таким образом, индексы неустойчивости, основанные на методе частицы, показывают низкие показатели успешности при прогнозе количества осадков и 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 CAPE < 2500 Дж/кг и при значениях индекса LI > -3°C вероятность выпадения сильных осадков ( $\geq 30$  мм/12 ч) значительно уменьшается. Причем для индекса LI отмечается более высокая надежность. Поэтому рассмотренные индексы можно использовать при составлении прогнозов выпадения сильных осадков как дополнительный метод к основному.

**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 которыми 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 ч. 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 сравнению 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 Дж/кг и при значениях индекса LI > -3°C вероятность выпадения сильных осадков ( $\geq 30$  мм/12 ч) значительно уменьшается.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК*

1. 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. Вып. 3. С. 295–306.
2. **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.
3. **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. Вып. 1. С. 88–96.

### *Статья, включенная в базу данных Scopus*

4. Kostarev S.V., **Sivkov B.A.**, Vetrov A.L., Tiunov V.E., Bykov A.V. Synoptic typification of heavy rain events in Perm region // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems, ENVIROMIS-2018. 2018. С. 012060.

### *Статьи в других изданиях*

5. **Сивков Б.А.**, Калинин Н.А. 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 Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), посвященной Международному Дню воды, и Дню работника гидрометеорологической службы и празднованию 75-летия Великой Победы. Уфа, 2020. С. 29–33.
6. **Sivkov B.A.** Extreme precipitation and features of their precipitation in the territory of Perm region // Weather and climatic workshop extremes: data, analysis and impact. Томск, 2020. С. 389.
7. **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.

8. Калинин Н.А., **Сивков Б.А.**, Пищальникова Е.В. Оценка термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края с помощью параметров неустойчивости // В сборнике: Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Материалы международной научно-практической конференции. Посвящается 85-летию факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ. Под общей редакцией С.А. Куролапа, Л.М. Акимова, В.А. Дмитриевой. Воронеж. 2019. С. 43–45.

Подписано в печать \_\_\_\_\_.2022 г.  
Усл. печ. л. \_\_\_\_ Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_  
614068, Пермский край, г. Пермь, ул. Сергея Данщина, д. 7 корп. Д  
ООО «Типография «Здравствуй»