

На правах рукописи



Пищальникова Евгения Владимировна

**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОБИЛЬНЫХ СНЕГОПАДОВ
НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология,
агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Пермь – 2015

Работа выполнена на кафедре метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Калинин Николай Александрович

Официальные оппоненты: **Васильев Александр Александрович**,
доктор географических наук,
профессор, ФГБУ «Гидрометцентр
России», главный научный сотрудник (г.
Москва)

Важнова Надежда Александровна,
кандидат географических наук,
Казанский (Приволжский) федеральный
университет, ассистент кафедры
метеорологии, климатологии и экологии
атмосферы (г. Казань)

Ведущая организация: Национальный исследовательский
Томский государственный университет
(г. Томск)

Защита состоится 18 декабря 2015 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.189.10 в ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, корп. 8, 2 этаж, аудитория 215.

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.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук, доцент



Т.А. Балина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Атмосферные осадки, как и погода в целом, играют важную роль в жизнедеятельности человека. Поэтому изучение условий выпадения и распределения атмосферных осадков, а также их интенсивность и фазовое состояние, вызывает интерес ученых всего мира. Выпадение обильных снегопадов оказывает неблагоприятное воздействие на ряд отраслей экономики. В зависимости от синоптических условий обильные снегопады могут уменьшать дальность видимости до критических значений, тем самым приводя к снижению скорости движения транспорта и осложняя взлет и посадку воздушных судов, а также способствуют образованию снежных заносов и накатов, затрудняя работу наземного транспорта и, порой, останавливая её полностью. Выпадение обильного мокрого снега создает колоссальную нагрузку на линии электропередач, приводя к их обрыву, и тем самым наносит социальный и экономический ущерб. Таким образом, актуальность темы диссертации определяется возросшей за последние годы потребностью в получении знаний об условиях формирования обильных снегопадов и возможностях их прогноза для эффективной работы отраслей промышленности, в частности транспортной системы, которая на территории Пермского края представлена трансконтинентальными железнодорожными, автомобильными и воздушными линиями благодаря выгодному физико-географическому положению.

Цель настоящей работы — выявление условий формирования неблагоприятных и опасных снегопадов на территории Пермского края для повышения качества их диагноза и прогноза.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- Оценка динамики основных характеристик очень сильных снегопадов, выявление особенностей их пространственно-временного распределения за 1969–2013 гг.
- Рассмотрение основных факторов осадкообразования. Определение связи индексов А.Л. Каца, как показателя макроциркуляции, с наличием и интенсивностью обильных снегопадов, выявление региональных особенностей синоптических условий образования и разработка их классификации. Выявление особенностей полей влагосодержания и вертикальных движений в период формирования очень сильных снегопадов в Пермском крае.
- Определение возможности применения современных подходов, таких как прогноз обильных снегопадов с помощью мезомасштабной гидродинамической модели WRF и использование эмпирических свя-

зей между количеством осадков и радиационной температурой на верхней границе облачности, полученной с помощью радиометра MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua, для обнаружения зон обильных осадков в холодный период года в Пермском крае.

Объектом исследования является одно из неблагоприятных и опасных природных явлений холодного периода года — сильный и очень сильный снегопад.

Предметом исследования являются условия образования сильных и очень сильных (обильных) снегопадов в Пермском крае.

Теоретические основы и методы исследования. Одним из методов анализа синоптических процессов является их классификация, которая позволяет в большом многообразии синоптических ситуаций найти общие черты развития процессов. Решением данной проблемы занимались в середине предыдущего столетия Н.А. Багров, Г.Я. Вангенгейм, А.А. Гирс и продолжают заниматься в наше время В.Ф. Маргазинова, R. Huth, Z. Ustrul и другие. Основоположниками синоптико-статистического направления в области прогнозирования являются Н.А. Багров, Д.А. Педь, Г.В. Груза. Последователи их школы — О.В. Батырева, Л.Е. Лукиянова, Н.Н. Мякишева, М.И. Юдин, А.В. Мещерская. Вопросом режима атмосферной циркуляции на Урале занимались А.С. Шкляев, И.Я. Аликина, С.Х. Куликова, А.А. Успин, В.А. Шкляев и другие.

В настоящей работе применялись синоптико-статистический подход, методы математической статистики, гидродинамическое моделирование состояния атмосферы, ГИС-технологии.

Информационная база исследования. Аналитический обзор диссертации основан на научных работах (статьях и монографиях) и руководящих документах. Исследовательская часть диссертации базируется на метеорологических ежегодниках и ежемесячниках, архиве синоптических карт и данных аэрологического зондирования за 1969–2013 гг., значениях индексов А.Л. Каца, данных об общем влаго-содержании и скоростях вертикальных движений на основных изобарических поверхностях, извлеченных из архива реанализа по модели CFS за 1979–2013 гг., отдельных рассчитанных суммах осадков по модели WRF, информации о радиационной температуре на верхней границе облачности со снимков Terra/Aqua MODIS.

Научная новизна:

1. На основе анализа пространственно-временного распределения характеристик очень сильных снегопадов за 1969–2013 гг. установлена тенденция к уменьшению числа случаев опасных снегопадов и показано влияние сложного рельефа территории Пермского края на локали-

зацию очагов максимальной повторяемости и интенсивности рассматриваемого явления.

2. Впервые определены траектории смещения циклонов, под влиянием которых образовались снегопады опасной величины в Пермском крае, рассчитаны скорости смещения, определена термобарическая структура и эволюция циклонических образований.

3. Впервые проведена типизация синоптических ситуаций, при которых сложились благоприятные условия для формирования снегопадов опасной интенсивности. Выделено 11 видов синоптических ситуаций, которые сгруппированы по генезису на фронтальные, внутримассовые и смешанные.

4. Впервые получены значения (средние, минимальные, максимальные) общего влагосодержания атмосферы при выпадении очень сильных снегопадов в Пермском крае. Показана трансформация влаги в процессе эволюции и перемещения барических образований. Определены направления и скорости вертикальных движений, выявлено влияние на них орографии.

5. Определены возможности использования рассчитанных сумм осадков по модели WRF-ARW и данных радиометра MODIS о радиационной температуре на верхней границе облачности для диагноза и прогноза обильных снегопадов на территории Пермского края.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования. Результаты представляют собой дальнейшее развитие теории, методологии и практики диагноза и прогноза осадков холодного периода года на региональном уровне. Материалы исследования использованы при разработке курсов лекций в программах дисциплин «Синоптическая метеорология», «Учебное бюро погоды», «Региональная синоптика» на кафедре метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета.

Выполненная работа нашла научно-практическую реализацию в следующих проектах, выполненных в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» за 2009–2013 годы:

- «Влияние циклонической деятельности на условия формирования снежного покрова на Урале» (2011–2013 гг.).

- «Разработка физико-статистической модели формирования зимних опасных явлений погоды в циклонах умеренных широт на основе использования радиолокационных данных и численных моделей атмосферы с целью сверхкраткосрочного прогноза снегопадов» (2012–2013 гг.).

Апробация работы. Основные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, были представлены на 8 конференциях разного уровня: международная научная конференция по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (г. Казань, 2012 г.); международная научно-практическая конференция «Климатология и гляциология Сибири» (г. Томск, 2012); всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Географическое изучение территориальных систем» (г. Пермь, 2013 г.); конференция молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (г. Обнинск, 2013 г.); всероссийская научная конференция с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов» (г. Казань, 2013 г.); региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Географическое изучение территориальных систем» (г. Пермь, 2014 г.); межрегиональная научно-практическая конференция «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края» (г. Пермь, 2014 г.); международная научно-практическая конференция «География и регион» (г. Пермь, 2015 г.).

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 4 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 173 наименования, и приложения. Общий объем работы составляет 129 страниц, в том числе 22 рисунка и 21 таблицу. Приложение представлено на 48 страницах.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Определена тенденция к уменьшению числа случаев очень сильного снегопада за 1969–2013 гг. и показано влияние рельефа территории Пермского края на локализацию очагов максимальной повторяемости и интенсивности рассматриваемого явления.

В Пермском крае за период с 1969 по 2013 гг., который примерно совпадает с текущим потеплением климата, отмечено 54 случая очень сильных снегопадов. Данное явление является одним из опасных природных явлений (ОЯ) погоды в холодное время года. Средняя многолетняя интенсивность опасных снегопадов составила 24,1 мм/12ч, что при сопоставлении с климатическими нормами разных метеостанций (МС) соответствует от 42 до 118% месячной нормы осадков. Самый ранний снегопад в градации ОЯ выпал 2

октября 1978 г., самый поздний — 6 июня 1995 г. Повторяемость очень сильных снегопадов за исследуемый период составила от 1 до 7 случаев в год, причем наибольшая частота случаев фиксировалась в 70–90-е годы XX века. Нисходящий линейный тренд показывает общую тенденцию к уменьшению повторяемости рассматриваемого явления в Пермском крае (рис. 1).

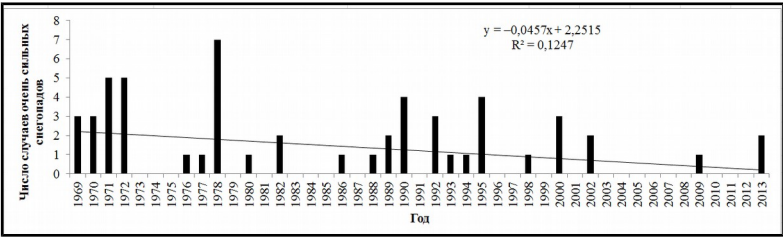


Рис. 1. Число случаев опасных снегопадов в Пермском крае за 1969–2013 гг.

Распределение очень сильных снегопадов по территории Пермского края характеризуется некоторыми особенностями, связанными с географическим положением и строением рельефа. Обширная зона с наибольшей повторяемостью опасных снегопадов от 5 до 9 случаев расположена на востоке края с максимумом в Чердыни и Губахе (рис. 2 а). Однако, область наименьшего числа случаев (от 0 до 2 случаев) обозначить трудно, так как единичные случаи хотя и преобладают на западе края, но отмечаются и на МС, расположенных в восточных районах, например, МС Бисер, Кын, Чернушка.

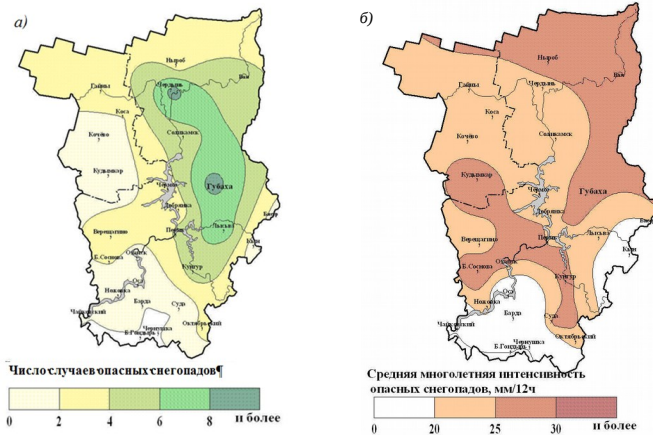


Рис. 2. Карта–схема числа случаев (а) и средней многолетней интенсивности (б) очень сильных снегопадов по территории Пермского края за 1969–2013 гг.

Пространственное распределение средней интенсивности имеет более сложную структуру (рис. 2 б). Выделяются две зоны с максимальной интенсивностью более 25,1 мм/12 ч. Первая из них расположена на юго-западе Пермского края с очагом на МС Большая Соснова (30,1 мм/12 ч). Установить причину такой локализации не представляется возможным, так как в данном пункте опасные снегопады наблюдались всего 2 раза за 45 лет и при разных синоптических ситуациях. Вторая зона расположена на северо-востоке региона с очагом на МС Ныроб (26,9 мм/12 ч), что может быть объяснено влиянием рельефа местности. Здесь на равнинной территории в непосредственной близости от Северного Урала дополнительный вклад в развитие облачности, а следовательно, в увеличение интенсивности осадков, вносят орографические вертикальные движения.

2. Синоптический метод с применением индексов циркуляции
А.Л. Каца позволил провести типизацию синоптических процессов на территории Пермского края и выделить 11 видов синоптических ситуаций, которые сгруппированы по генезису на фронтальные, внутримассовые и смешанные.

Анализ синоптических карт за 1979–2013 гг. позволил выявить 11 видов синоптических ситуаций, при которых на исследуемой территории отмечались снегопады в градации ОЯ. Согласно синоптической классификации осадки по природе своего происхождения принято делить на внутримассовые и фронтальные. Тогда, за исследуемый период 53% случаев опасных снегопадов в Пермском крае имело фронтальную природу развития. Доля внутримассовых снегопадов составила лишь 6%. Однако за полусуточные временные отрезки, в которые выпадают снегопады, на условия их формирования могут оказывать влияние и те и другие процессы, поэтому 41% случаев имел смешанную природу происхождения. Тогда, к фронтальным снегопадам относятся случаи, когда их образование происходило под влиянием теплого, холодного, холодного фронта с волнами и фронта окклюзии, что соответствует указанным в табл. 1 синоптическим ситуациям 1, 5, 6, 10. К внутримассовым снегопадам относятся случаи, когда их формирование происходило в теплом секторе и тыловой части циклона, что соответствует синоптическим ситуациям 4 и 8. Снегопады смешанного происхождения образуются при разных сочетаниях синоптических ситуаций (2, 3, 7, 9, 11), создающихся в результате смещения циклона и связанной с ним фронтальной системой.

В результате анализа синоптических ситуаций с учетом макропроцессов было установлено, что 37% случаев обильных снегопадов в

Пермском крае образовались при зональном типе циркуляции по А.Л. Кацу под влиянием циклонов всех видов, но большая часть снегопадов была связана с западными и северо-западными циклонами (табл. 1). При зональной циркуляции теплый фронт стал наиболее благоприятной синоптической ситуацией для выпадения обильных снегопадов. Повторяемость внутримассовых снегопадов существенно ниже, причем в тыловой части циклона обильные снегопады не наблюдались, а снегопады, сформированные в теплом секторе, связаны только с западными, северо-западными и местными циклонами. Снегопады смешанного типа имеют наименьшую повторяемость и чаще всего формируются под влиянием теплого фронта в сочетании с «северной шапкой» циклона. В то время как под влиянием фронта окклюзии в сочетании с центральной частью циклона обильные снегопады не выпадали.

Таблица 1

**Повторяемость обильных снегопадов при зональной циркуляции по А.Л. Кацу
в зависимости от типа циклона и синоптической ситуации**

Тип циклона	Синоптическая ситуация										
	1	5	6	10	4	8	2	3	7	9	11
Северо-западный	17	3	—	1	5	—	—	—	—	—	—
Западный	17	2	1	—	4	—	1	2	—	—	—
Юго-западный	2	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—
Северный	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Южный	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Местный	4	—	—	—	1	—	—	—	1	1	—
Примечание: 1) синоптические ситуации при образовании фронтальных снегопадов: 1 – теплый фронт, 5 – холодный фронт, 6 – холодный фронт с волнами, 10 – фронт окклюзии; 2) синоптические ситуации при образовании внутримассовых снегопадов: 4 – теплый сектор циклона, 8 – тыловая часть циклона; 3) синоптические ситуации при образовании снегопадов смешанного типа: 2 – теплый фронт в сочетании с центральной частью циклона, 3 – теплый фронт в сочетании северной частью циклона, 7 – тыловая часть циклона в сочетании с вторичными холодными фронтами, 9 – центральная часть циклона, 11 – центральная часть циклона в сочетании с фронтом окклюзии.											

Макроциркуляция меридионального типа по А.Л. Кацу в силу своего деления на формы может быть рассмотрена более детально. При западной форме большинство обильных снегопадов носило фронтальный характер с явным превосходством влияния теплого фронта, связанного, как правило, с циркуляцией северо-западных циклонов. Внутримассовые снегопады при данной форме макроциркуляции чаще всего образовывались в теплом секторе циклона западного типа, снего-

пады смешанного типа выпадали под влиянием различных частей северо-западных циклонов (табл. 2).

При смешанной форме циркуляции были представлены все виды синоптических ситуаций, при которых формируются фронтальные и внутримассовые снегопады, но обильный снегопад смешанного происхождения отмечен в единичном случае в тылу западного циклона под влиянием вторичных холодных фронтов (табл. 2). Наибольшая повторяемость обильных снегопадов, образованных под влиянием теплого фронта, зафиксирована при данной форме макроциркуляции.

Таблица 2

**Повторяемость обильных снегопадов при различных формах
меридиональной циркуляции по А.Л. Кацу
в зависимости от типа циклона и синоптической ситуации**

Форма	циклонатип	Синоптическая ситуация										
		1	5	6	10	4	8	2	3	7	9	11
Западная	СЗ	9	2	—	—	—	1	—	2	1	—	1
	З	3	3	1	—	4	1	—	—	—	—	—
	Ю	4	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ЮЗ	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	С	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	М	—	—	—	1	—	—	—	—	1	—	—
Смешанная	СЗ	2	1	1	—	—	1	—	—	—	—	—
	З	6	2	—	1	4	—	—	—	1	—	—
	Ю	3	1	—	—	1	—	—	—	—	—	—
	ЮЗ	5	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
	С	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	М	3	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—
Восточная	СЗ	6	1	—	—	2	—	—	—	—	—	1
	З	9	3	—	—	2	—	—	—	—	—	—
	Ю	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	М	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Центральная	СЗ	4	—	1	—	2	—	—	—	—	—	—
	З	3	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—
	Ю	2	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
	С	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
	М	2	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
Примечание: 1) синоптические ситуации при образовании фронтальных снегопадов: 1 – теплый фронт, 5 – холодный фронт, 6 – холодный фронт с волнами, 10 – фронт окклюзии; 2) синоптические ситуации при образовании внутримассовых снегопадов: 4 – теплый сектор циклона, 8 – тыловая часть циклона; 3) синоптические ситуации при образовании снегопадов смешанного типа: 2 – теплый фронт в сочетании с центральной частью циклона, 3 – теплый фронт в сочетании северной частью циклона, 7 – тыловая часть циклона в сочетании с вторичными холодными фронтами, 9 – центральная часть циклона, 11 – центральная часть												

циклона в сочетании с фронтом окклюзии.

Тип циклона: СЗ – северо-западный, З – западный, Ю – южный, ЮЗ – юго-западный, С – северный, М – местный.

Обильные снегопады при восточной форме меридиональной циркуляции наблюдались только при 4-х видах синоптических ситуаций (табл. 2). Большая часть снегопадов была связана с западными и северо-западными циклонами с явным превосходством влияния теплого фронта над другими. Под влиянием северных и юго-западных циклонов при данной форме обильные снегопады не отмечались.

При центральной форме меридиональной циркуляции наблюдалась минимальная повторяемость обильных снегопадов (табл. 2), большая их часть образовалась под влиянием северо-западных и западных циклонов, а с циклонами юго-западного типа не отмечено ни одного случая. Наибольшая повторяемость обильных снегопадов также связана с влиянием теплого фронта, теплого сектора циклона и холодного фронта с волнами. При данной форме циркуляции, чаще чем при других, благоприятные условия для выпадения обильных снегопадов складывались под влиянием холодного фронта с волнами.

Таким образом, зная будущее тип и форму макроциркуляции по А.Л. Кацу, а также синоптическую ситуацию на территории Пермского края, можно качественно оценить возможность образования неблагоприятного или опасного снегопада.

3. Установлены предельные значения количества влаги в атмосфере, направление и скорость вертикальных движений в период выпадения очень сильных снегопадов на территории Пермского края.

Величина общего влагосодержания атмосферы при выпадении опасных снегопадов в Пермском крае изменялась от 3,2 до 20,4 $\text{кг}/\text{м}^2$, причем основная часть случаев рассматриваемого ОЯ наблюдалась при содержании влаги от 4 до 16 $\text{кг}/\text{м}^2$. Общее влагосодержание имеет внутригодовую изменчивость, которая согласуется с внутригодовой вариацией интенсивности опасного снегопада (рис. 3).

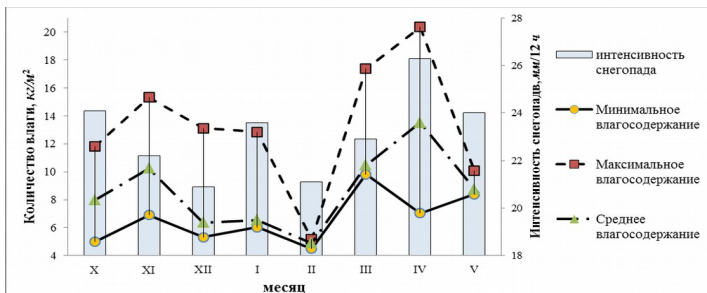


Рис. 3. Интервалы общего влагосодержания в атмосфере и интенсивность опасных снегопадов за 1979–2013 гг. в Пермском крае по месяцам.

В осенне-зимний период снегопады наблюдаются при минимальных значениях влаги в атмосфере от 4,5 до 6,9 $\text{кг}/\text{м}^2$, в весенний — от 7,0 до 9,8 $\text{кг}/\text{м}^2$. Максимальные значения аналогичного распределения не имеют, но можно обозначить пиковые: с минимумом в феврале — 5,2 $\text{кг}/\text{м}^2$ и максимумом в апреле — 20,4 $\text{кг}/\text{м}^2$.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что опасные снегопады, выпадающие в апреле (феврале), имеют максимальную (минимальную) интенсивность благодаря наличию высокого (низкого) содержания влаги в атмосфере.

Территориальное распределение полей вертикальных движений, осредненных за 1979–2013 гг. на разных изобарических поверхностях в период образования опасных снегопадов в Пермском крае, имело сходные черты: наблюдались восходящие потоки, а очаг максимальной скорости был локализован в одном пункте (рис. 4).

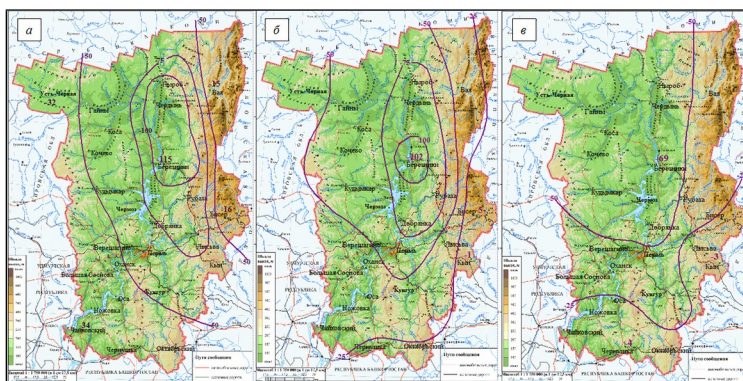


Рис. 4. Среднее поле вертикальных движений над Пермским краем при выпадении опасных снегопадов на разных изобарических поверхностях:
а – 850, б – 700, в – 500 гПа .

Средняя скорость восходящих движений составляла $-57 \text{ гПа}/12 \text{ ч}$ на изобарической поверхности 850 гПа , $-50 \text{ гПа}/12 \text{ ч}$ — на изобарической поверхности 700 гПа , $-40 \text{ гПа}/12 \text{ ч}$ — на изобарической поверхности 500 гПа . Максимальный очаг скорости был локализован на МС Березники.

Таким образом, очаги максимальных значений скорости восходящих движений на различных высотах представляли собой вытянутую вдоль 57 в.д. область длиной более 200 км, и располагались на равнин-

ной территории на расстоянии 50–70 км до подножия Уральских гор, что соответствует локализации очагов максимальной повторяемости очень сильных снегопадов.

4. Спутниковые данные Terra/Aqua MODIS и мезомасштабная модель WRF-ARW позволяют обнаруживать и прогнозировать зоны обильных снегопадов на территории Пермского края

Для формирования обильных осадков в облаках должна присутствовать кристаллическая фаза и переохлаждённые капли. Отсюда следует вывод: чем ниже температура верхней границы облака, тем больше осадков из этого облака может выпасть. Сопоставление значений радиационной температуры и осадков за холодный период 2013 г. в Пермском крае позволило установить, что 61% случаев выпадения осадков приходится на вторую и третью градации значений радиационной температуры, т.е. от –11,6 до –27,3°C (табл. 3).

Таблица 3
Распределение количества выпавших осадков в зависимости от радиационной температуры облачности в Пермском крае за холодный период 2013 г.

№ градации	Градация преобладающей радиационной температуры облачности, °C	Середина градации, °C	Относительная частота	Интервал количества выпадающих осадков, мм	Среднее количество осадков, мм	% слабых снегопадов	% умеренных снегопадов	% сильных снегопадов	% очень сильных снегопадов
1	–3,7..–11,5	–7,6	3,8	0–10	1,8	66,7	22,2	11,1	–
2	–11,6..–19,4	–15,5	28,4	0–24	2,0	57,5	33,5	8,6	0,4
3	–19,5..–27,3	–23,4	32,6	0–26	2,1	58,2	31,0	10,5	0,3
4	–27,4..–35,2	–31,3	18,8	0–16	3,4	33,0	49,4	17,6	–
5	–35,3..–43,1	–39,2	8,1	0–17	4,0	27,6	48,7	23,7	–
6	–43,2..–51,0	–47,1	3,5	0–16	4,2	39,4	27,3	33,3	–
7	–51,1..–58,9	–55,0	3,1	0–11	3,2	31,0	58,6	10,3	–
8	–59,0..–66,8	–62,9	1,3	0–3	1,2	75,0	25,0	–	–
Примечание. Общее число случаев — 938; число случаев небольших осадков — 467; число случаев умеренных осадков — 346; число случаев сильных осадков — 123; число случаев очень сильных осадков — 2; значение коэффициента корреляции — –0,67									

Распределение осадков по интенсивности позволяет выявить соответствующие им градации преобладающей радиационной температуры облачности (табл. 3):

- небольшие осадки в большинстве случаев выпадают при значениях радиационной температуры, соответствующих 1, 2, 3 и 8-й градациям;
- умеренные осадки — 7-й градации;

- сильные осадки — 6-й градации;
- очень сильные осадки — 2 и 3-й градациям.

Тот факт, что большинство случаев умеренных (58,6%) и сильных (33,3%) осадков наблюдались в пределах 7-й и 6-й градациях радиационной температуры облачности соответственно, позволяет применить их в качестве критерия при обнаружении зон значительных осадков в холодную часть года в Пермском крае.

В данном исследовании в качестве главного инструмента расчета прогностических сумм осадков использована негидростатическая модель WRF в варианте ARW, установленная на суперкомпьютере «ПГУ–Тесла». Прогнозы по модели WRF составлялись на срок 48 ч от 0 ч текущих суток по ВСВ. Модель запускалась с шагом, равным 10 км по пространству и 60 с по времени с выдачей данных через каждые 3 ч. Для дальнейшего анализа использовались результаты счета на срок 15, 27 и 39 ч от начала прогноза, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения выпавших осадков на метеостанциях. Оценка прогноза осадков проводилась по Наставлению по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения и по методике, применяемой в Гидрометцентре России. Случаи для оценки подобраны таким образом, что выпадение обильных снегопадов было связано с циклонами различных типов, находящихся на разных стадиях развития, а их прогноз составлен с разной заблаговременностью (от 15 до 39 ч).

Величины критерия Пирси–Обухова (T), рассчитанные для территории Пермского края, составили от 0,0 до 1. Уровень оценок показал, что идеальные ($T=1$) или близкие к ним ($T=0,75$) прогнозы были составлены 15 марта и 13 октября с заблаговременностью 15 и 27 ч (табл. 4).

Таблица 4

Успешность численных экспериментов прогноза осадков разной интенсивности в Пермском крае с помощью модели WRF

Дата прогноза	Время прогноза заблаговременно	Показатели успешности прогноза								
		T	U	U_0	U_{BO}	P_0	P_{BO}	δQ	σ_Q	$P_{<3}$
23.04.2009 г. в 0 ч ВСВ	15 ч*	0	78	78	0	100	0	-0,7	3,2	78
	27 ч	0	78	78	0	100	0	0,5	2,4	91
	39 ч	0	96	96	0	100	0	0,8	3,8	87
15.03.2013 г. в 0 ч ВСВ	15 ч	0,75	88	81	100	100	75	0,2	0,8	100
	27 ч	0,75	96	95	100	100	75	0,7	3,4	100
	39 ч*	0	96	96	0	100	0	0,6	3,2	40
13.10.2013 г. в 0 ч ВСВ	15 ч	1	100	100	100	100	100	0,3	1,7	88
	27 ч*	1	100	100	0	100	0	-0,2	0,8	88

	39 ч	0	96	96	0	100	0	0,0	0,1	96
Примечание: * — заблаговременность прогноза снегопада в градации ОЯ										

Средняя общая оправдываемость прогноза (U) составила 89, 91 и 96% при заблаговременности 15, 27 и 39 ч. Оправдываемость прогноза наличия осадков (U_o) мало отличается от общей оправдываемости, а предупрежденность прогноза наличия осадков (Π_o) с разной заблаговременностью достигает 100%. Средняя оправдываемость прогноза отсутствия осадков (U_{bo}) характеризуется низкими показателями и составляет 67, 33 и 0% при заблаговременности на 15, 27 и 39 ч. Модель WRF-ARW завышает площадь распространения осадков. В большинстве расчетных периодов не было ни одного пункта, где модель прогнозировала бы условия без осадков, в то время как фактически отмечались области свободные от осадков. В тех случаях, когда модель все-таки прогнозировала отсутствие осадков, их предупрежденность (Π_{bo}) была высокой и составляла 75–100%. Величина надежности количественного прогноза осадков ($P_{<3} = n_{<3} / n_{00}$) в среднем достигала 94% при заблаговременности на 15 и 27 ч и 68% — на 39 ч.

Таким образом, модель WRF-ARW корректно прогнозирует области обильных осадков с некоторым их завышением по исследуемой территории, успешно воспроизводит выпадение небольших и умеренных снегопадов, а в отдельных случаях и сильных снегопадов, однако очень сильные снегопады модель не воспроизвела по причине ошибок в начальных данных, т.е. в данных глобальной модели GFS.

Заключение. В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты:

1. Выявлена общая тенденция к уменьшению случаев опасных снегопадов в Пермском крае, основная часть которых наблюдалась в 70–90 годы XX века. Установлено, что рельеф местности влияет на распределение повторяемости опасных снегопадов, наибольшая частота которых отмечена на метеостанциях в непосредственной близости от подножия Уральских гор.

2. Изучены основные факторы формирования обильных осадков в холодную часть года. Показано, что большинство обильных снегопадов обусловлено меридиональным типом макроциркуляции по А.Л. Кацу с явным превосходством западной и смешанной формы над другими. Однако снегопады, выпавшие 16 марта и 14 октября 2013 г., достигли критерия опасного явления при зональном типе макроциркуляции. Следовательно, зональный макропроцесс является необходимым условием для образования опасного снегопада.

3. Разработана региональная синоптическая классификация, согласно которой, 53% случаев очень сильных снегопадов имело фронтальную природу развития, 41% — смешанную, 6% — внутримассовую. Анализ атмосферных процессов при образовании опасных снегопадов позволил выделить 11 видов синоптических ситуаций. Показано, что 53% случаев рассматриваемого явления сформировалось под влиянием двух синоптических ситуаций: теплого фронта и сочетания теплого фронта с центральной частью циклона, как правило, северо-западного типа. Установлены предельные значения характеристик теплого фронта при образовании очень сильного снегопада: горизонтальный градиент температуры в зоне фронтального раздела над Пермским краем по приземной карте составлял $2-5^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$, по карте AT_{850} — $10-16^{\circ}\text{C}/500\text{ км}$, по карте OT_{1000}^{500} — $26-40\text{ гп. дам}/1000\text{ км}$, что соответствует примерно $13-20^{\circ}\text{C}/1000\text{ км}$, приземная линия фронта соответствовала изотерме -5°C на карте AT_{850} и была ориентирована с северо-запада на юго-восток, скорость прохождения фронта через пункт, где отмечено ОЯ, составляла $5-20\text{ км/ч}$.

4. Впервые изучено общее влагосодержание атмосферы в период выпадения опасных снегопадов в Пермском крае, которое изменялось от $3,2$ до $20,4\text{ кг/м}^2$. Выявлена зависимость максимальной (минимальной) интенсивности явления от наличия высокого (низкого) содержания влаги в атмосфере. При этом на МС, расположенных на больших высотах, опасный снегопад формируется при меньшем содержании влаги в атмосфере, чем на МС, находящихся на малых высотах.

5. В процессе эволюции циклонического образования содержание влаги в атмосферном воздухе уменьшается. Воздушная масса, сформированная в системе юго-западного циклона в начале жизненного цикла, содержит больше влаги, чем в системах других типов циклонов, но на стадии заполнения барических образований влагосодержание выравнивается. Показано, что появление локального очага с повышенным содержанием влаги на фоне однородного поля общего влагосодержания в области фронтального раздела может служить предвестником образования волнового возмущения. Рекомендуется в отсутствие космических снимков облачности использовать данные о влагосодержании в оперативной практике синоптика при фронтологическом анализе, так как фронтальный раздел легко обнаруживается по наибольшим горизонтальным градиентам влагосодержания.

6. Впервые изучены поля вертикальных движений при формировании очень сильных снегопадов в Пермском крае и их зависимость от рельефа, которая особенно ярко проявляется на изобарической поверхности 850 гПа . Очаги максимальной скорости подъема

частиц воздуха расположены в предгорьях Урала и соответствуют очагам наибольшей повторяемости рассматриваемого явления.

7. Радиационная температура на верхней границе облачности может использоваться в качестве критерия обнаружения зон сильных снегопадов в Пермском крае в декабре, январе феврале и апреле. Для обнаружения зон очень сильных снегопадов применение данной характеристики нецелесообразно.

8. Мезомасштабная модель WRF-ARW адекватно воспроизводит синоптическую ситуацию, эволюцию барических образований и расположение фронтальных разделов. Данная гидродинамическая модель корректно прогнозирует области значительных осадков с некоторым завышением сумм осадков по исследуемой территории, успешно воспроизводит выпадение небольших и умеренных снегопадов, в отдельных случаях и сильных снегопадов. Осадки очень сильной величины модель не воспроизвела по причине ошибок в начальных данных, формируемых глобальной моделью GFS.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Калинин Н.А., Попова (Пищальникова) Е.В. Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15–16 марта 2013 года // Учен. зап. РГГМУ. СПб.: Изд. РГГМУ, 2013. № 32. С. 7–17.

2. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Свизов Е.М., Попова (Пищальникова) Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 21–30.

3. Пищальникова Е.В. Динамика опасных снегопадов в Пермском крае за период 1969–2013 гг. // Вестн. Удм. ун-т. Сер. Биология. Науки о Земле. 2014. Вып. 3. С. 119–124.

4. Пищальникова Е.В., Калинин Н.А. Влагосодержание атмосферы в период выпадения очень сильных снегопадов в Пермском крае // Вестн. Том. гос. ун-та. 2015. № 397. С. 240–247.

Статьи в журналах и научных сборниках:

5. Попова (Пищальникова) Е.В. Пространственно-временное распределение очень сильных снегопадов в Пермском крае // Климатология и гляциология Сибири: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2012. С. 223–224.

6. Попова (Пищальникова) Е.В. Особенности формирования интенсивных снегопадов в марте 2013 года на территории Пермского края // Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Казань: Изд-во «Отечество», 2013. С. 126–128.

7. Попова (Пищальникова) Е.В. Синоптические условия формирования сильных и очень сильных снегопадов в Пермском крае 15–17 марта 2013 г. // Географическое изучение территориальных систем: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2013. С. 104–107.

8. Пищальникова Е.В. Влияние циклонической деятельности на формирование очень сильных снегопадов в Пермском крае // Географическое изучение территориальных систем: сб. материалов регион. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2014. С. 87–92.

9. Пищальникова Е.В. Аналитический обзор современного состояния проблемы влияния циклонической деятельности на условия формирования обильных осадков в холодный период года // Географический вестник. Пермь, 2014. № 1(28). С. 69–79.

10. Пищальникова Е.В., Шихов А.Н. Использование спутниковых данных Terra/Aqua MODIS для прогноза обильных снегопадов в Пермском крае // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: сб. науч. тр. межрегион. науч.-практ. конф. Пермь: «Учебный центр «Информатика», 2014. С. 91–98.

11. Пищальникова Е.В. Связь между радиационной температурой на верхней границе облачности и количеством осадков в холодный период года // Географический вестник. Пермь, 2015. № 1(32). С. 57–60.

12. Пищальникова Е.В. Пространственно-временное распределение влагосодержания атмосферы при выпадении очень сильных снегопадов в Пермском крае // География и регион: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2015. С. 118–122.

Тезисы докладов:

13. Попова (Пищальникова) Е.В. Сильные и очень сильные снегопады: условия формирования и пространственно-временное распределение // Междунар. науч. конф. по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Казань: Изд-во «Отечество», 2012. С. 69–70.

14. Попова (Пищальникова) Е.В. Синоптические условия формирования интенсивных снегопадов в Пермском крае 15–17 марта 2013 г. // Конф. молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Обнинск: «Принт-сервис», 2013. С. 242–244.

Содержание диссертации

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

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

1.1. Физические и синоптические условия формирования атмосферных осадков

1.2. Методы прогноза атмосферных осадков

2. ВРЕМЕННОЕ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЧЕНЬ СИЛЬНЫХ СНЕГОПАДОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ

2.1. Краткое физико-географическое описание Пермского края

2.2. Временное распределение и пространственные особенности основных характеристик очень сильных снегопадов за 1969–2013 гг.

3. ОСНОВНЫЕ ОСАДКООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

3.1. Режим атмосферной циркуляции

3.1.1. Особенности атмосферной циркуляции над Уралом при выпадении очень сильных снегопадов в Пермском крае за 1979–2013 гг.

3.1.2. Классификация атмосферных процессов, способствующих формированию обильных снегопадов в Пермском крае

3.2. Влагосодержание атмосферы

3.2.1. Пространственно-временное распределение общего влагосодержания атмосферы при выпадении очень сильного снегопада в Пермском крае

3.2.2. Изменчивость общего влагосодержания в процессе эволюции циклона

3.3. Поле вертикальных движений

3.3.1. Особенности поля вертикальных движений над Пермским краем в период выпадения очень сильных снегопадов

3.3.2. Влияние рельефа Пермского края на поле вертикальных движений при формировании очень сильных снегопадов

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

4.1. Применение спутниковой информации для количественной интерпретации осадков в холодный период года

4.2. Применение модели WRF для изучения условий образования и прогноза снегопадов

4.2.1. Характеристики применяемой мезомасштабной модели

4.2.2. Методика оценки успешности численных экспериментов по прогнозу осадков разной интенсивности

[4.2.3. Численный прогноз осадков разной интенсивности с помощью модели WRF для территории Пермского края](#)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ПРИЛОЖЕНИЕ

Подписано в печать _____.2015 г. Формат 60х84/16

Усл. печ. л. ____ Тираж 100 экз. Заказ _____

614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Типография Пермского государственного
национального исследовательского университета