

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

На правах рукописи



Тунаев Евгений Леонидович

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТНЫХ ЦИКЛОНОВ В
ЦЕНТРАЛЬНЫХ И ЮЖНЫХ РАЙОНАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:

доктор географических наук, профессор

Горбатенко Валентина Петровна

Томск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ЦИКЛОНЫ КАК ОДНА ИЗ ОСНОВНЫХ ФОРМ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ ПОГОДУ И КЛИМАТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....	12
1.1 Физико-географические особенности территории.....	12
1.2 Общая характеристика циклонов.....	13
1.2.1 Механизмы формирования и стадии развития.....	13
1.2.2 Классификация циклонов.....	19
1.2.3 Погодные условия в разных частях циклона.....	20
1.3 История изучения циклонической активности.....	25
1.3.1 Изучение циклогенеза над различными районами Северного полушария.....	25
1.3.2 Изучение циклогенеза над Западной Сибирью.....	29
2. АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ ПРОГНОЗОВ БАРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, РАССЧИТЫВАЕМЫХ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....	33
2.1 Анализ полей основных метеорологических величин. Методические аспекты обработки информации.....	33
2.1.1 Оценка связи рядов данных.....	33
2.1.2 Методы осреднения и экстраполяции данных.....	36
2.1.3 Виды анализа, реализуемые в пакете «Statistica». Кластерный анализ.....	39
2.2 Численные методы и технологии прогноза, используемые синоптиками в оперативной практике.....	42
2.2.1 Методы и технологии прогноза метеорологических элементов.....	44
2.2.2 Модель прогноза погоды COSMO-RU.....	45
2.3 Анализ модели COSMO-RU с позиции прогноза циклогенеза и его последствий.....	52

3. ЦИКЛОГЕНЕЗ В ЦЕНТРЕ И НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....	64
3.1 Идентификация местных циклонов.....	64
3.1.1 Циклоны, выраженные в барическом поле.....	65
3.1.2 Циклоны, выраженные в поле облачности.....	69
3.2 Характеристики циклонов, образовавшихся в междуречье Обь-Иртыш.....	74
3.3 Многолетняя повторяемость и сезонные особенности формирования циклонов в междуречье Обь-Иртыш.....	82
4. ЭНЕРГЕТИКА АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЦИКЛОГЕНЕЗЕ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМИ И ЮЖНЫМИ РАЙОНАМИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....	85
4.1 Основные виды энергии.....	85
4.2 Анализ общих запасов энергии, накапливаемых местными циклонами в период их «жизни». Методические аспекты обработки информации.....	87
5. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТНЫХ ЦИКЛОНОВ В МЕЖДУРЕЧЬЕ ОБЬ-ИРТЫШ В 1976–2017 ГГ.....	92
5.1 Связь местных циклонов с общей циркуляцией атмосферы.....	92
5.2 Многолетние устойчивые центры повышенного циклогенеза. Синоптические, орографические, энергетические особенности данных районов..	98
5.3 Роль болот в формировании климата.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	108
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	112
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А Исследуемая территория.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Прогностические (по модели COSMO-RU) и фактические барические поля.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ В Прогноз осадков и его оправдываемость по территории НСО за срок 12 ВСВ 15 марта 2013 года.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Случаи образования местных циклонов.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Список станций аэрологического зондирования.....	140

ПРИЛОЖЕНИЕ Е Соотношение значений энергий в циклонах, классифицированных по различным признакам.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Сезонные характеристики местных циклонов.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ З Влияние общей циркуляции атмосферы на процессы циклогенеза над Западной Сибирью.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Западная Сибирь относится к территориям с активной циклонической деятельностью [25, 30–35, 39–42, 67, 68], при этом повышенный циклогенез отмечается в междуречье Обь-Иртыш, расположенном в ее центральных и южных районах (50–64°с.ш., 60–90°в.д.). Циклоны, оказывающие влияние на погоду и климат Западной Сибири, могут приходить как из других районов, так и зарождаться непосредственно над ее территорией (местные циклоны), причем в междуречье Обь-Иртыш их образуется около 25 ежегодно [104], что составляет 20 % [36, 38] всех циклонов, определяющих погоду региона. Появление таких циклонов не всегда могут предсказать имеющиеся в оперативной практике модели погоды, что в значительной степени сказывается на качестве прогностического материала и степени успешности прогнозов погоды, особенно, осадков [110, 112]. Анализ многолетней динамики циклонической активности на территории Западной Сибири показал, [38] что происходит увеличение повторяемости местных циклонов, вследствие чего представляет значительный интерес решение следующих вопросов:

1) Насколько изменилась активность циклогенеза над Западной Сибирью в последние десятилетия по сравнению с ранними исследованиями (Л.И. Бордовская, К.И. Попова, И.П. Прокопьева, Т.С. Ситникова и др.) и сказывается ли влияние общепланетарной тенденции климатических изменений.

2) Погоду и климат каких районов Западной Сибири определяют местные циклоны, и как они влияют на оправдываемость методов и моделей прогноза погоды.

3) Энергетические особенности атмосферы в дни с циклогенезом. Отличие по энергетическим параметрам местных циклонов от циклонов, приходящих на территорию Западной Сибири.

4) Каково влияние болотных систем, в том числе Большого Васюганского болота на процессы циклогенеза.

В условиях меняющегося климата изучение характеристик местных циклонов, образующихся в центральных и южных районах Западной Сибири, является актуальным и послужит для совершенствования имеющихся в оперативной практике методов и моделей прогноза погоды и улучшения качества прогностического материала.

Большой вклад в изучение циклонической активности на территории Западной Сибири внесли: Л.И. Бордовская, К.И. Попова, И.П. Прокопьева, Т.С. Ситникова, В.П. Горбатенко, И.И. Ипполитов, Н.В. Поднебесных и др.

Цель работы: выявить особенности формирования местных циклонов и предполагаемые причины динамики их активности на фоне меняющегося климата Западной Сибири.

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

1. На основе прогностического материала модели международного консорциума COSMO-RU (барическое поле у поверхности земли и на уровне 500 гПа), использующейся синоптиками в качестве основной для прогноза осадков, и фактических данных определить влияние местного циклогенеза на оправдываемость прогнозов. Выявить наиболее характерные ошибки в модельных прогнозах конфигурации барического поля, а именно: факт наличия или отсутствия местного циклона, продолжительность его «жизни», интенсивность, местоположение, траектории смещения, степень вертикального развития и др.

2. На основе анализа синоптических карт погоды и данных спутникового мониторинга для циклонов, образующихся в центральных и южных районах Западной Сибири определить следующие характеристики: происхождение, продолжительность «жизни», степень вертикального развития в толще атмосферы, минимальное давление в центрах, район образования и траектории смещения. Провести их классификацию по этим признакам для выявления различий в механизмах развития разных групп местных циклонов.

3. Выявить сезонную и межгодовую изменчивость повторяемости и суммарной продолжительности «жизни» местных циклонов и причины ее изменчивости.

4. Рассчитать запасы основных видов энергии (кинетическая, потенциальная, внутренняя и энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды) в тропосфере за два дня до момента образования местного циклона, в период его «жизни», а также в день, следующий после его полного заполнения. Определить пороговые значения энергий, при которых инициируется циклогенез.

5. По совокупности признаков провести классификацию местных циклонов, позволяющую выделить пространственные и временные, а также физические особенности их формирования.

6. Выявить многолетние устойчивые центры повышенного циклогенеза, построить карту их пространственного распределения. Проанализировать совокупность механизмов, обуславливающих наличие этих центров.

7. Составить рекомендации по улучшению прогноза погоды с учетом образования мезоциклонов над территорией центра и юга Западной Сибири.

Объектом исследования является слой атмосферы от поверхности земли до верхней границы тропосферы (12 км) над территорией Западной и Восточной Сибири, горной части Южной Сибири (Алтай, Саяны), а также Уральских гор.

Предметом исследования являются характеристики атмосферы в дни местного циклогенеза и предшествующий период.

Материалы и методы исследования:

1. Для исследования циркуляции атмосферы над Сибирью были использованы приземные синоптические карты за основные метеорологические сроки (00, 06, 12 и 18 ч ВСВ) за период 1976–2007 гг., приземные кольцевые карты погоды (за сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 ч ВСВ), карты барической топографии (из архива данных ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»), спутниковые снимки (предоставляемые специалистами ФГБУ «НИЦ Планета») за 2008–2017 гг., а также ежедневные прогностические поля модели COSMO-RU (рассчитываемые ЗС РИВЦ) для территории Западной и Восточной Сибири за 2013–2017 гг.

2. Для изучения энергетических запасов атмосферы в слое от поверхности земли до уровня АТ–200 были использованы данные аэрологического

зондирования 22 станций, находящихся на территории России и 4 на территории Казахстана за 2008–2017 гг.

3. Для анализа успешности прогнозов погоды были использованы ежедневные оценки оперативных прогнозов отдела метеопрогнозов ГМЦ ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», и автоматизированные оценки модели COSMO-RU, представляемые специалистами ФГБУ «СибНИГМИ» за 2013–2017 гг.

4. В качестве местных циклонов рассматривалась область пониженного давления при наличии хотя бы одной замкнутой изобары с характерной циркуляцией и структурой метеорологических полей. Рассматривались только те барические образования, которые обнаруживались на кольцевых картах погоды не менее четырех соседних сроков, а на приземных синоптических картах не менее двух сроков. Выводы получены при использовании синоптических методов, пакетов прикладных программ MicrosoftOffice, Statistica.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлено, что повторяемость и суммарная продолжительность «жизни» местных циклонов имеет тенденцию к увеличению, как в сезонном, так и в межгодовом ходе.

2. Впервые для циклонов, образующихся над исследуемой территорией, выявлены сезонные особенности формирования над разными видами подстилающей поверхности.

3. Впервые для местных циклонов на всем протяжении их «жизни» получены значимые показатели изменения запасов кинетической энергии и энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды.

4. Выявлены многолетние устойчивые центры повышенного циклогенеза. Впервые построена карта пространственного распределения основных очагов циклогенеза разного генезиса и для разных сезонов года.

5. Выявлен существенный вклад болот Западной Сибири (в том числе Большого Васюганского болота) в процессы формирования и развития местных циклонов за счет дополнительного притока влаги с поверхности водоема, особенно заметного в летний период.

Научная и практическая значимость работы. Полученные результаты демонстрируют важность учета региональных особенностей формирования и развития местных циклонов, которые вносят существенное искажение в прогностические поля метеорологических величин, в особенности в прогнозы осадков, получаемых моделью COSMO-RU. Выявлены наиболее характерные ошибки в модельных прогнозах барического поля. Определены прогностические признаки активизации местного циклогенеза. Результаты работы могут быть применены в общих и специализированных прогнозах погоды, при составлении штормовых предупреждений об опасных (ОЯ) и приравненных к ним комплексах неблагоприятных метеорологических явлений погоды (КМЯ). В частности, могут быть использованы при разработке программно-алгоритмического обеспечения для проведения расчетов наличия и степени конвективной неустойчивости атмосферы и возможного появления опасных явлений погоды в зоне ответственности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» и его филиалов, а также в других структурных подразделениях Росгидромета.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9-ти российских и международных конференциях:

1. Международная конференция и школа молодых учёных по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS, г. Томск, 11–16.07.2016 г.

2. Всероссийская молодежная конференция (с международным участием) «Географические исследования молодых ученых в регионах Азии», г. Барнаул, 7–11.11.2016 г.

3. Всероссийская молодёжная научно-практическая конференция «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики», г. Томск, 18–22.09.2017 г.

4. IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы географии и геологии», г. Томск, 16–19.10.2017 г.

5. XII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатологическому мониторингу, г. Томск, 17–20.10.2017 г.

6. Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIRONMENTIS, г. Томск, 5–11.07.2018 г.

7. Всероссийская молодёжная научно-практическая конференция «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики», г. Красноярск, 24–28.09.2018 г.

8. XVI международная конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом, г. Иркутск, 16–21.09.2019 г.

9. XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатологическому мониторингу», г. Томск, 15–19.10.2019 г.

Результаты диссертации использовались при выполнении работ по 2 НИР, финансируемым РФФИ:

1. «Прогноз лесных пожаров в Томской области» (2011 г.)

2. «Оценка климатических условий развития транспортной системы Томской области и прилегающих к ней территорий» (2018–2019 гг.)

По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, включая 4 статьи в журналах из списка ВАК РФ, а также 1 работа в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора. Все анализируемые результаты работы получены автором лично. В частности, автором самостоятельно составлена база данных об активности местных циклонов за 1976–2017 гг. Подготовка к печати научных работ, отражающих результаты исследований, осуществлялась как самостоятельно, так и при участии соавторов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников, а также приложений. Общий объём работы составляет 144 страницы, 31 цветной и черно-белый рисунок, 5 таблиц и 8 приложений. Библиографический

список включает 167 наименований, в том числе 47 иностранных. Обзор литературы представлен в первой главе.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю д.г.н., профессору В.П. Горбатенко за моральную поддержку, внимание и научные консультации. Благодарность всему коллективу кафедры метеорологии и климатологии Томского государственного университета за дельные рекомендации и замечания. За помощь и поддержку на разных этапах исследования сотрудникам ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»: начальнику ГМЦ А.М. Лапчик, начальнику отдела метеопрогнозов М.В. Виноградовой, пресекретарю Р.А. Ягудину; ведущему научному сотруднику ФГБУ «СибНИГМИ» М.Я. Здеревой; ведущему метеорологу отдела обработки спутниковой информации ФГБУ Сибирского центра «НИЦ Планета» И.А. Мартыновой.

1. ЦИКЛОНЫ КАК ОДНА ИЗ ОСНОВНЫХ ФОРМ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ ПОГОДУ И КЛИМАТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

1.1 Физико-географические особенности территории

Западная Сибирь (Приложение А) занимает обширную площадь (2,4 млн. км²) и лежит между Уральскими горами на западе и Средне-Сибирским плоскогорьем на востоке, включает Западно-Сибирскую равнину (90 % площади) и горы Юга Сибири. Основная часть территории характеризуется континентальным климатом умеренного пояса и расположена в природных зонах от лесотундры и лесной зоны на севере до степей и лесостепей на юге. Здесь протекает множество рек, самая крупная – Обь и ее притоки, среди них: Иртыш, Тобол, Томь, Чулым и др. Обь, протекая с юго-востока на северо-запад, делит территорию на две почти равные части, а именно левобережную и правобережную. Только северная часть, расположенная вдоль морей Северного Ледовитого океана входит в зону арктических пустынь. При движении с юга на север происходит понижение рельефа. Средняя высота территории не превышает 200 метров над уровнем моря.

Западная Сибирь – это единственный регион на Земном шаре, где около 30 % территории занимают болота. Только зона тайги включает 141 млн. га, из них половина заболочена. Болота являются основным источником пресной воды в регионе (запасы воды – 400 км³), здесь расположены около 800 тысяч небольших озёр, множество рек берут начало из болот.

Особенно много болот в центре и на юге Западной Сибири в междуречье Обь-Иртыш (70% площади) [19]. Здесь находится крупнейшее в мире Большое Васюганское болото (БВБ), занимающее площадь более 5,5 млн. га, что составляет около 2% общей площади торфяных болот всего мира. Оно протянулось с запада на восток около 550 км, с севера на юг в осевой части в среднем 50–80 км, с учетом отрогов или «языков» – до 270 км. Значительная часть

рассматриваемой территории относится к зоне ответственности ФГБУ «Западно-Сибирского УГМС» и его филиалов.

1.2 Общая характеристика циклонов

Циклоны представляют собой атмосферные вихри с низким давлением в центре, характеризуются сложной циркуляцией воздуха и структурой полей метеорологических величин, а также своеобразными погодными условиями в разных частях барического образования. В процессе своего движения они приносят с собой влажный и теплый воздух с океанов на материки, оказывая при этом существенное влияние на погодно-климатический режим различных регионов.

Циклогенез – возникновение и развитие циклонов в атмосфере. Согласно волновой теории циклонообразования данный процесс связан с появлением на фронте динамически неустойчивых волн. В долине фронтальной волны развивается циклон, а в гребне – антициклон. Наиболее интенсивно циклоническая деятельность развита в умеренных широтах, где ее можно рассматривать как форму общей циркуляции атмосферы. Циклоническая активность особенно развита в зимнее время, когда отмечаются наибольшие контрасты температур между тропическими и полярными широтами, а также между материками и океанами.

1.2.1 Механизмы формирования и стадии развития

Циклоны, как правило, являются результатом возникновения на тропосферном фронте динамически неустойчивых бароклинных волн [51, 117-159]. Под бароклинной неустойчивостью понимается динамическая неустойчивость в основном зональном переносе, которая связана с наличием меридионального градиента температуры, и, как следствие, термического ветра

[51; 159]. Источником энергии растущих возмущений в таком потоке служит доступная потенциальная энергия атмосферы.

В процессе циклогенеза играют важную роль термический фактор, а также тепло- и влагообмен с подстилающей поверхностью [20, 130, 167, 154]. При перемещении с холодной поверхности на теплую холодная и сухая воздушная масса насыщается теплом и влагой. Быстрое образование облачности с выделением скрытого тепла может привести к развитию глубокой конвекции [17, 29, 151] и образованию интенсивного мезоциклона, то есть циклона небольшого масштаба.

Также способствует циклогенезу баротропная неустойчивость атмосферы [72, 152]. Динамическая волновая неустойчивость бездивергентного потока связана с горизонтальным сдвигом ветра. При этом могут образоваться так называемые вихри сдвига (shear vortex) незначительных размеров, которые при соответствующих дополнительных условиях на верхних уровнях трансформируются в МЦ. Во время данного процесса кинетическая энергия баротропных возмущений возрастает за счет кинетической энергии основного переноса [13]. Выявлено, что из всех видов энергии, преобразующихся в циклонах умеренных широт, особое место занимает кинетическая энергия. Это обусловлено тем, что она в наибольшей степени отражает физическую сущность процессов, происходящих в циклонах. По этой причине одна из главных проблем теории общей циркуляции атмосферы – проблема описания трансформации кинетической энергии в циклонах умеренных широт (ЦУШ).

Для гидродинамического описания развития мезоциклона и его конвективных систем используется концепция так называемой условной неустойчивости второго рода (conditional instability of the second kind – CISK) [131]. Эта концепция впервые была использована для описания развития тропических циклонов [128, 129], но впоследствии она была применена также и для других мезоциклонов [126, 155]. Основная идея этой концепции заключается в представлении о взаимодействии и взаимном усилении возмущений двух различных масштабов: глубокой влажной конвекции [45] и циклонического

вихря. [75, 127, 134]. Вихрь привносится извне и может быть следствием бароклинной неустойчивости (отмечающейся в области возникновения этого возмущения), влияния орографии и других факторов. Присутствие циклонической циркуляции приводит к конвергенции воздуха к центру, где развивается мощная конвекция в условно-неустойчивом воздухе с выделением тепла. Далее происходит взаимное усиление циклонической циркуляции и конвекции, в результате чего развивается интенсивный мезоциклон [138]. Важнейшая особенность условной неустойчивости второго рода, в отличие от бароклинной неустойчивости, состоит в том, что источником ее энергии является выделение скрытого тепла при глубокой конвекции, а не кинетическая либо потенциальная энергия основного потока. Возможно, этот механизм может способствовать образованию МЦ и в исследуемом районе, но, вряд ли является основным.

Практика показывает, что синоптические вихри формируются как низкие барические образования и охватывают на начальных стадиях своего развития только нижний слой тропосферы толщиной 2–3 км [98]. Это означает, что в реальных условиях наиболее часто потеря устойчивости происходит именно в нижних слоях атмосферы. Присутствие планетарных волн и близость высотной фронтальной зоны (ВФЗ) [73], вдоль которой отмечаются повышенные градиенты температуры и давления, расширяет возможности возникновения синоптических вихрей в атмосфере и формирует районы, наиболее благоприятные для зарождения циклонических синоптических вихрей, так называемые бароклинно-активные районы [123, 159], к которым можно отнести территорию Васюганья с его особым микроклиматом. Здесь расположены огромные резервуары пресной воды в виде многочисленных рек и озер, которые являются дополнительным источником влаги. Также выявлено [105], что около 40 % всех образующихся над Западной Сибирью молодых циклонов получили импульс к развитию непосредственно над территорией Большого Васюганского болота.

Циклоны, развиваясь по вертикали, часто занимают всю толщу тропосферы, достигая при этом горизонтальных размеров в нескольких тысяч километров. В

них отмечается вращение воздушных масс вокруг оси против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой – в южном.

В общем, для всех циклонов выделяют следующие этапы развития [23]:

1) стадия возникновения – от начальных признаков появления циклонической циркуляции, до первой замкнутой изобары. Продолжительность этой стадии менее 12 часов;

2) стадия молодого циклона или стадия углубления – от момента появления первой замкнутой изобары на приземной синоптической карте до момента прекращения интенсивного углубления. Продолжительность до 2-х суток;

3) стадия максимального развития – давление в центре циклона существенно не меняется, начинается процесс окклюдирования;

4) стадия заполнения – от момента значительного роста давления в центре циклона до исчезновения циклонической циркуляции у поверхности земли.

Последние две стадии делятся в основном до 3–4 суток. Для фронтальных циклонов выделяют следующие стадии развития:

1) стадия волны – аналогично стадии возникновения;

2) стадия молодого циклона – до начала процессов окклюдирования;

3) стадия окклюдирования – от начала окклюдирования до заполнения циклона. Для нефронтальных циклонов данная стадия включает стадию максимального развития и стадию заполнения.

Нередки случаи регенерации циклонов, когда начавшееся заполнение циклона сменяется его новым углублением. Данный процесс отмечается при вхождении в систему существующего циклона нового основного фронта, а также при развитии вблизи центра существующего циклона нового центра с последующим их слиянием либо при быстром заполнении старого. В обоих случаях обязательным условием является поступление в тыл циклона новой порции холодного воздуха. В некоторых случаях процессы регенерации отмечаются неоднократно, вследствие чего обширные малоподвижные циклоны могут существовать длительное время. После регенерации циклон проходит аналогичный вновь возникшим барическим образованиям путь развития, но на

фоне более низкого давления. Регенерировавший циклон имеет внешние признаки молодого циклона.

Таким образом, фронтальные циклоны образуются при возникновении волн на полярном фронте (фронте умеренных широт), а затем теплого сектора с теплой и холодной ветвями фронта. Через несколько дней «жизни» циклона теплый и холодный фронты сливаются, а его центр вытесняется к северу, где отмечается относительно однородная холодная масса. При отсутствии энергии для поддержания существования циклона он заполняется и полностью исчезает. Продолжительность данного процесса составляет около недели.

В большинстве случаев циклоны движутся серией, как правило, по четыре и находятся в разных стадиях развития. Каждый последующий циклон в цепочке формируется значительно южнее предыдущего. В серии первым идет наиболее старый, находящийся в стадии окклюдирования циклон. Циклонические вихри обычно разделены гребнями высокого давления, обеспечивающими короткие периоды ясной погоды между продолжительными осадками. Завершает это семейство антициклон в субтропиках.

Границей раздела холодных воздушных масс, зародившихся в умеренных широтах, и относительно теплых масс более низких широт выступает фронтальная система умеренных широт, называемая полярным фронтом. Он, имея значительную протяженность, с небольшими разрывами опоясывает всю планету. На полярном фронте зарождаются депрессии умеренных широт (рис. 1.1).

Зарождению циклонов способствует наличие значительных температурно-влажностных контрастов между воздушными массами, участвующими в его образовании. В умеренных широтах преобладает западный перенос, поэтому для развития циклона на полярном фронте, необходимо, чтобы теплый воздух двигался на восток с большей скоростью, чем холодный. Как правило, такие барические депрессии начинаются с мелких волновых возмущений на фронтальной поверхности. С появлением волны, теплый воздух устремляется к северу, а холодный к югу, возникает вихревое движение. Теплый воздух

медленно поднимается вдоль клина холодного на теплом фронте; холодный воздух подтекает под теплый воздух на холодном фронте. Данный процесс сначала начинается у поверхности Земли, затем распространяется в верхние слои атмосферы. Одновременно с этим происходит падение давления в центре молодого барического образования и его углубление.

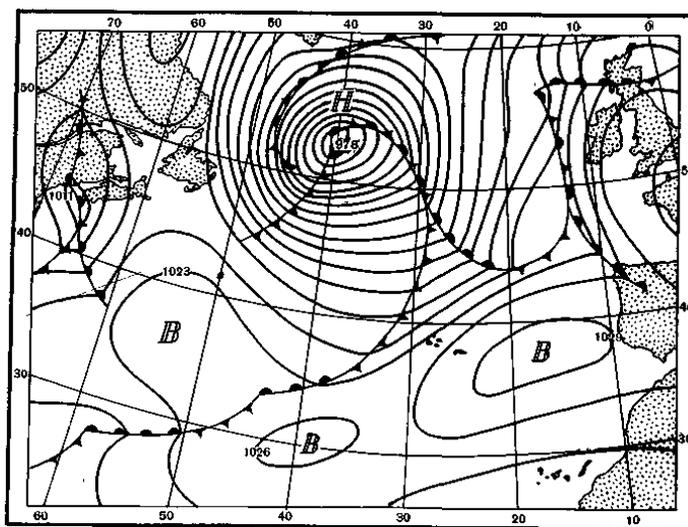


Рис. 1.1. Возникновение циклона

При неравномерной скорости движения воздушных масс, когда холодный фронт «нагоняет» теплый, фронты закручиваются и сливаются, происходит процесс окклюдирования, при этом образуется фронт окклюзии (рис. 1.2).

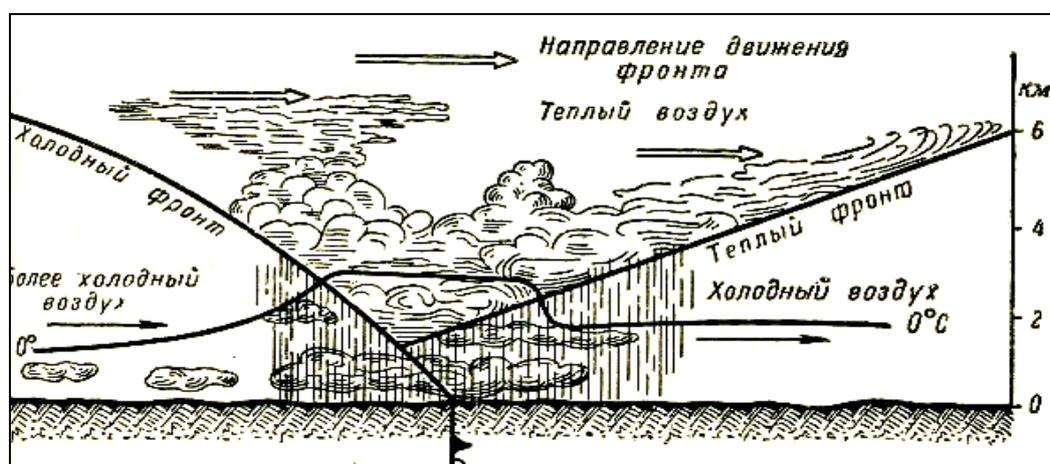


Рис.1.2. Развитие фронта окклюзии

1.2.2 Классификация циклонов

Существуют различные классификации циклонов [23]. Так по широтной зоне, в которой циклоны формируются, их делят на: внетропические и тропические. По связи с основными фронтальными разделами выделяют: фронтальные и нефронтальные циклоны. Циклоны умеренных широт (ЦУШ) или внетропические циклоны, в основном являются фронтальными, формируясь на полярном фронте. Циклоны также могут быть и нефронтальными, то есть внутримассовыми: термические депрессии, депрессии вертикальной неустойчивости и топографические депрессии, образующиеся только над материками. Формирование термических циклонов происходит из-за разницы в нагреве воды и суши. Летом давление над материками меньше, чем над водной поверхностью. Например, низкое давление над Азией в июле, известно как Южно-Азиатский муссонный циклон, определяющий погоду на обширной территории Юго-Восточной Азии. При развитии депрессий вертикальной неустойчивости решающим фактором выступает температурная неустойчивость по вертикали. Падение давления происходит вследствие разности температур между теплым воздухом, вовлеченным в циклон, и окружающим его воздухом. До тех пор, пока градиенты температуры невелики и не превышают предел устойчивости ($1^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$), эти циклоны неглубоки. С увеличением градиентов температуры, возможно, образование более глубоких циклонов.

Циклоны могут быть как одноцентровыми, так и многоцентровыми, когда два или более близко расположенных центра на периферии имеют общие замкнутые изобары. Второй центр называют вторичным или частным циклоном. Они могут играть значительную роль в развитии барических систем.

По скорости перемещения барические депрессии делятся на: подвижные, малоподвижные и стационарные. В начале своего развития циклоны движутся со значительной скоростью (до 40–50 км/ч), при этом средняя скорость перемещения циклонов составляет около 30–40 км/ч. На поздних стадиях развития, когда циклоны превращаются в высокие барические образования, скорость их

перемещения уменьшается (5–10 км/час). И они становятся малоподвижными. Циклоны, перемещающиеся со скоростью менее 5 км/ч, называются стационарными. Бывают «вторичные» или «частные» циклоны, то есть барические депрессии, вовлеченные в циркуляцию больших, или более интенсивных депрессий (основные или первичные). Они, как правило, быстро движутся по периферии основного циклона, огибая его против часовой стрелки.

Циклоны умеренных широт (ЦУШ) [61–63] являются важнейшими элементами общей циркуляции атмосферы, на фоне которых над различными районами может происходить формирование мезоциклонов, то есть циклонов меньшего масштаба, так называемых местных циклонов (МЦ). В отдельных случаях они могут развиваться до размеров синоптического масштаба с радиусом более 1000 км, становясь основными циклонами.

1.2.3 Погодные условия в разных частях циклона

В разных частях циклона отмечаются условия погоды, отличающиеся по характеру распределения полей основных метеорологических величин. В центре циклона располагается район с наименьшим (минимальным) давлением, при наличии нескольких таких мест депрессия называется многоцентральной. Изобары, ограничивающие центр депрессии, зачастую имеют форму, близкую к кругу или овалу. Давление в центре депрессии в умеренных широтах, как правило, составляет 950–1010 гПа. От центра циклона в ложбинах проходят фронты (рис. 1.3). До начала процессов окклюдирования они направлены в разные стороны. Теплый фронт ориентирован на восток, юго-восток или юг и простирается, примерно, на тысячу километров, постепенно исчезая. Холодный фронт уходит далеко на запад или юго-запад. На нем возможно появление новых циклонов.

Значительная по мощности облачность находится в центре циклона, широкой полосой перед теплым фронтом и сравнительно узкой полосой вокруг холодного или за ним, в зависимости от параметров самого холодного фронта. Граница облачного вихря примерно совпадает с положением последней замкнутой

изобары на приземной синоптической карте погоды. Осадки выпадают на огромных территориях, лишь в тыловой части циклона облаков и осадков значительно меньше.

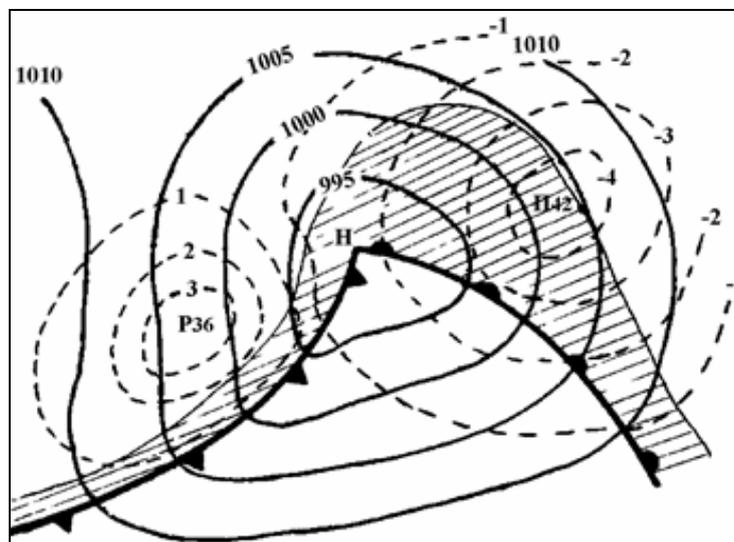


Рис. 1.3. Молодой циклон

Вследствие того, что холодный воздух тяжелее теплого воздуха, отмечается рост давления. Это проявляется в отклонении изобар влево при приближении теплого фронта, при пересечении линии холодного фронта в обратном направлении, изобары отклоняются вправо в холодном воздухе.

Поскольку сам циклон и связанные с ним фронты со временем перемещаются примерно в одном направлении, то в каждой фиксированной точке пространства перед теплым фронтом отмечается падение давления. После его прохождения падение прекращается, а ветер поворачивает вправо (в северном полушарии). Чаще всего перед теплым фронтом наблюдается юго-восточный ветер. В теплом секторе циклона он перестраивается на западный, а после прохождения холодного фронта – становится северо-западным.

Обычно с циклонами связывают пасмурную с осадками и сильными ветрами погоду. Антициклон, напротив, характеризуется малооблачной без осадков и слабыми ветрами погодой. Однако такое представление является весьма условным, так как погодные условия в этих крупномасштабных атмосферных

вихрях зависят от таких факторов как район, где находится пункт наблюдения, а также от индивидуальных особенностей циклонов и антициклонов.

Погодные условия во внетропических циклонах определяются свойствами вовлекаемых воздушных масс, интенсивностью циклонов и активностью фронтов, скоростями вертикальных движений воздуха, географическими особенностями территории, сезоном года, свойствами подстилающей поверхности, стадией его развития и т.д.

Наиболее типичный циклонический характер погоды отмечается в молодом циклоне. В этом случае выделяют три зоны с отличающимися друг от друга условиями погоды (рис. 1.4).

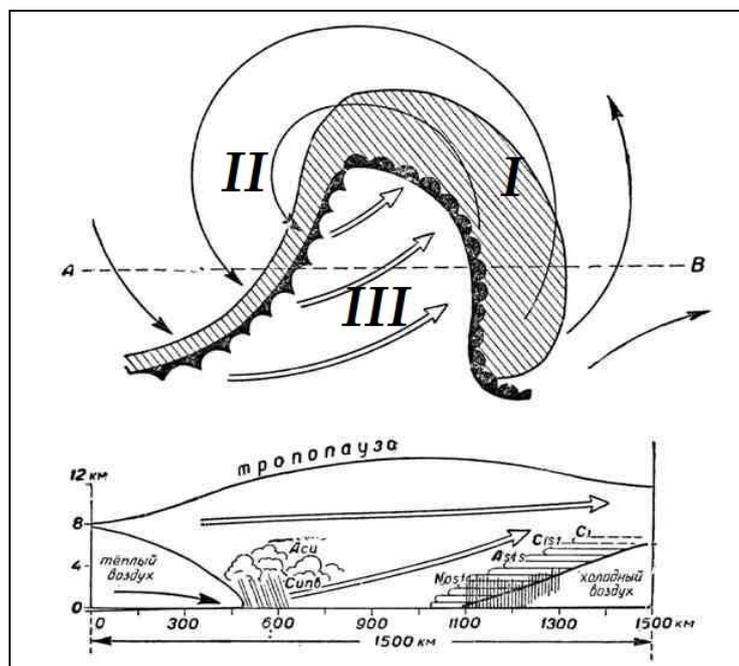


Рис. 1.4 Погода в циклоне: сверху – схема циклона, внизу – вертикальный разрез циклона по линии АВ

Зона I – передняя и центральная части циклона. Погодные условия здесь обуславливаются холодной устойчивой воздушной массой и приближающимся теплым фронтом. При приближении к центру циклона и линии теплого фронта, а также с быстрым его углублением и значительной влажности воздуха, образуются слоисто-дождевые облака (*Ns*), нередко захватывающие вершину теплого сектора, из которых выпадают интенсивные обложные осадки. Становится более мощной

система слоисто-дождевых и высоко-дождевых облаков ($Ns-A_s$). Зимой в таких случаях может наблюдаться резкое ухудшение видимости, а летом возможны грозы. При низких значениях влажности воздуха облачная система не успевает полностью развиться, поэтому осадки в этом случае менее интенсивны и чаще носят морозящий характер. Вдоль линии теплого фронта отмечается широкая (300–400 км, а в холодный период до 600 км) полоса обложных осадков, видимость при этом ухудшается.

Зона II – тыловая часть циклона за холодным фронтом. Погода здесь обуславливается холодной неустойчивой воздушной массой и свойствами холодного фронта. При высокой влажности и значительной неустойчивости воздушной массы в этой зоне выпадают осадки и нередки грозы. В непосредственной близости от фронта отмечается шквалистый ветер, возможен град. Если фронт движется медленно и его облачная система является зеркальным отражением облачной системы теплого фронта, то за ним будут обложные осадки на протяжении, как правило, не более 200 км. По мере прояснения (за линией холодного фронта) на большом удалении видимость улучшается и может быть значительный (особенно в холодное время года) рост атмосферного давления. Скорость ветра зависит от плотности сгущения изобар. При значительной влажности воздуха местами возможно образование кучево-дождевых облаков (Cb) и выпадение ливневых осадков внутримассового характера.

При быстром движении холодного фронта в относительно неширокой полосе (50–100 км) вдоль линии фронта выпадают ливневые осадки. Вдали от фронта, так же, как и в первом случае, холодный воздух стратифицирован неустойчиво, видимость хорошая, погода малооблачная, возможны локальные осадки из Cb .

Зона III – теплый сектор между фронтами. Характер погоды здесь обуславливается теплой устойчивой воздушной массой: пасмурно, сплошная или значительная слоистая или слоисто-дождевая облачность (St, Sc), обложные и морозящие осадки, адвективные туманы, плохая видимость, умеренные и слабые ветры, низкое давление (ровный ход или слабое падение). Летом погода может

быть облачной или безоблачной, а иногда даже с ливневыми осадками в зависимости от устойчивости и влажности теплого воздуха.

В молодом циклоне теплый воздух движется быстрее, чем перемещается сам вихрь, поэтому все новые и новые порции теплого воздуха поступают в циклон, опускаются вдоль клина холодного воздуха в его тылу и поднимаются в передней части. В таком состоянии циклон находится около 2 суток. Примерно вдвое дольше (3–4 суток) продолжается стадия окклюдирования. Постепенно теплый сектор циклона сужается и наступает момент, когда движущийся быстрее холодный фронт нагоняет теплый и смыкается с ним. Центральные районы циклона у поверхности земли заполняются холодным воздухом, а теплый сектор оттесняется в более высокие слои. В этом и заключается процесс окклюдирования циклона и наступает стадия максимального развития циклона. На приземной карте циклон очерчивается максимальным числом изобар, вплоть до исчезновения последней замкнутой изобары.

Вначале окклюдирования выделяют несколько зон с различными условиями погоды. В окклюдированном циклоне зоны преобладающих условий погоды аналогичны молодому циклону, тем не менее, теплый сектор в окклюдированном циклоне либо полностью отсутствует, либо располагается на его периферии. Поэтому в окклюдированном циклоне практически выделяются лишь две зоны преобладающих условий погоды: обширная передняя область циклона перед фронтом окклюзии и тыловая часть за фронтом окклюзии. Условия погоды здесь определяются свойствами воздушных масс по обе стороны от фронта окклюзии. Характер погоды в передней части окклюдированного циклона в холодное время года определяется теплым фронтом окклюзии, а в теплое время года – холодным фронтом окклюзии. Условия погоды в тыловой части окклюдированного циклона схожи с условиями погоды в тыловой части молодого циклона. По мере заполнения циклона зона осадков распадается на отдельные участки, фронты размываются, и условия погоды постепенно выравниваются во всех секторах циклона.

Скорость ветра в циклоне достигает максимальных значений сразу же после начала процессов окклюдирования. Область наибольших скоростей ветра располагается на расстоянии $1/3$ радиуса вихря вблизи холодного атмосферного фронта.

Начало окклюдирования циклона является поворотным моментом в его развитии. Барическая депрессия достигает наибольшей глубины у земной поверхности, и циклон становится высоким холодным барическим образованием. Далее наступает стадия заполнения циклона, отмечается рост атмосферного давления, уменьшение скорости ветра, сокращение от срока к сроку количества изобар. В южном полушарии молодой циклон представляет собой зеркальное отображение циклона северного полушария.

1.3 История изучения циклонической активности

1.3.1 Изучение циклогенеза над различными районами Северного полушария

Наиболее изученными регионами мезомасштабного циклогенеза в Северном полушарии являются прибрежные территории северной Атлантики и Баренцева моря [122, 125, 156, 166]. Несколько меньше исследована северо-западная часть Тихого океана, хотя особенности мезомасштабного циклогенеза в этом регионе последнее время активно изучаются [124]. Значительный период времени успешно изучалась мезоциклоническая деятельность над Японским морем [132, 148, 47, 165]. Над восточным сектором Евразийской Арктики мезомасштабный циклогенез практически не изучался [46]. И если над Чукотским и Карским морями обнаруживались отдельные мезомасштабные циклоны, то почти постоянно покрытые льдом моря Лаптевых и Восточно-Сибирское считались районами, над которыми мезомасштабный циклогенез маловероятен [155]. Есть предположения [58, 149], что таяние арктических льдов, усиление

меридиональности атмосферных процессов и появление сезонности ледяного покрова могут быть причиной мезоциклонической деятельности.

В России, в основном, проводились работы по изучению общей циклонической активности [92, 93] и описанию предпосылок циклогенеза, без анализа физических механизмов и влияния подстилающей поверхности на формирование мезовихрей. Для территории Сибири подобные исследования практически не проводились, а те, что проводились, имели эпизодический характер.

В работе [27] исследовались особенности циркуляции атмосферы при циклогенезе в холодный период для Азиатско-Тихоокеанского региона. Автором было выявлено, что после активного циклогенеза над Азиатско-Тихоокеанским регионом зимой поверхностная температура повышается в северо-западной части Тихого океана, летом – Японского и Охотского морей, и снижается в Беринговом море весной. Кроме того, воздействие глубоких циклонов может способствовать перераспределению вод, богатых биогенами, что, как правило, приводит к эволюции гидробиологических характеристик и к дальнейшему изменению биопродуктивности. Поэтому изучение циклонической активности представляет большой интерес в контексте рыбохозяйственных исследований.

Для числовой характеристики состояния циклонов в течение зимы автором был использован индекс циклоничности, предложенный А.В. Куницыным в 1956 году для приземных циклонов.

В ходе анализа использовались ежедневные синоптические карты Японского метеоагентства. Весь район исследования ($30-65^{\circ}$ с.ш., 130° в.д.– 160° з.д.) разбивался на квадраты $5 \times 5^{\circ}$, и подсчитывалось число центров циклонов, прошедших над каждым таким квадратом в течение месяца. На картах, рядом с центром циклона, указывалось количество очерчивающих его замкнутых изобар (n), и затем подсчитывалась сумма их квадратных значений (n^2) для каждого пятиградусного квадрата, т.е. определялись «локальные» индексы циклоничности. Оценка энергетической активности циклонов проводилась путем поквadratного суммирования общего индекса циклоничности ($N = \sum n^2$) как ежемесячно (январь,

февраль, март), так и суммарно для всего зимнего сезона. Расчет индексов охватывал двадцатилетний период (1992–2011 гг.).

Также рассматривались параметры сезонных центров действия атмосферы (ЦДА), такие как Алеутская депрессия и Сибирский максимум, барические образования, формирующиеся над Японским, Охотским и Беринговым морями.

Для оценки термического режима привлекалась информация о температуре воды на поверхности и сплоченности льда в дальневосточных морях. Для данных выборок проводился программный анализ.

В ходе анализа динамики месячных и сезонных значений индекса циклоничности было выявлено, что интенсивность зимней циклонической деятельности в регионе существенно меняется год от года. Выявляется общая направленность на увеличение флуктуации индексов. Автор предполагает, что это может свидетельствовать о том, что в течение последних двух десятилетий происходит постепенное усиление интенсивности циклоничности над Тихоокеанским регионом зимой. Однако в 2010–2011 гг. отмечено некоторое снижение циклонической активности во все зимние месяцы.

Было выявлено, что после активной зимней циклонической деятельности, в теплые сезоны года возникают предпосылки и для усиления летних центров действия атмосферы. Интенсивность зимней циклонической деятельности непосредственным образом связана с последующим состоянием системы «Атмосфера–Океан».

Работа [46] была посвящена исследованию мезомасштабного циклогенеза над восточным сектором Евразийской Арктики (ВЕА) при аномально низкой (2007 г.) и высокой (2014 г.) ледовитости арктического бассейна за период 2003–2014 гг.

Для исследования был выбран осенний сезон (сентябрь–ноябрь) как период обострения мезоциклонической деятельности в регионе ВЕА. Для идентификации мезоциклонов в полях вектора приводного ветра были использованы данные реанализа NCEP-CFSR, а в полях облачности данные спектрометра MODIS (спутники Terra и Aqua). Условия формирования и развития оценивались по

данным реанализа ERA-Interim и картам приземного анализа и барической топографии Национального климатического центра NOAA.

В зону исследования входили Чукотское, Карское и Восточно-Сибирское моря, а также море Лаптевых. Необходимость изучения циклогенеза в этом регионе авторами связывалась с резким ухудшением погоды, растущей ролью Северного морского пути, освоением новых районов рыболовства и разработкой месторождений нефти на арктическом шельфе.

Исследования были проведены на основе комплексного анализа мультисенсорных спутниковых измерений и реанализа с высоким разрешением. Метеорологические поля до наступления полярной ночи дополнялись видимыми изображениями облачности по данным MODIS со спутников Terra и Aqua. В условиях наступления темноты для отдельных случаев по данным спектрометра MODIS восстанавливались инфракрасные изображения облачности.

Синоптические процессы анализировались по картам приземного анализа и барической топографии Национального климатического центра данных США (NOAA) [133, 137] и реанализа ERA-Interim.

В ходе исследования было выявлено, что пик мезоциклонической активности в северном полушарии приходится на зимние месяцы (декабрь–февраль), когда взаимодействие океана и атмосферы становится наиболее интенсивным. Большая часть акваторий арктических морей уже в ноябре быстро покрывается льдом, а так как циклоны образуются над открытой водой, их количество резко снижается.

В декабре мезоциклоны обнаруживаются лишь над Чукотским морем, которое замерзает значительно позже остальных морей из-за поступления более теплых вод из прилегающих районов Берингова моря. В сентябре же температурные контрасты между океаном и атмосферой недостаточны для активизации мезоциклогенеза. Все это приводит к смещению пика мезоциклонической активности с зимних месяцев на октябрь, что можно считать региональной особенностью данной территории.

Было выявлено, что, несмотря на общее сокращение арктического ледяного покрова, в октябре 2007 г. большая часть моря Лаптевых была покрыта льдом, тогда как Восточно-Сибирское море было полностью свободно ото льда. В 2014 г. картина резко изменилась. На фоне аномально высокой за исследуемый период ледовитости Арктики море Лаптевых в октябре было практически свободно ото льда, а северная часть Восточно-Сибирского моря была покрыта льдом. Это говорит о зависимости интенсивности мезомасштабного циклогенеза от изменения площади ледяного покрова для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

Авторами были сделаны следующие выводы:

1. Интенсивность мезомасштабного циклогенеза над морями Лаптевых и Восточно-Сибирским согласуется с колебаниями их ледовитости. Для Карского и Чукотского морей такая взаимосвязь отсутствует.

2. В год образуется порядка 50 мезоциклонов над бассейном восточного сектора Евразийской Арктики. Региональной особенностью является пик циклогенеза, приходящийся на октябрь.

3. Частично потенциальные районы формирования мезоциклонов расширяются к северу вслед за отступающей кромкой льда.

4. Предположительно, вклад бароклинной неустойчивости пограничного слоя атмосферы в формирование и развитие восточноарктических циклонов преобладает над вкладом конвекции.

1.3.2 Изучение циклогенеза над Западной Сибирью

Из ранних исследований циклонической активности над Западной Сибирью наиболее детальные принадлежат Л.И. Бордовской [11, 12]. Она отслеживала траектории перемещения центров всех барических образований: циклонов и антициклонов, смещающихся на территорию Западной Сибири с других районов, а также барических форм, образующихся, непосредственно, на исследуемой территории за период с 1964 по 1967 гг. Ею были построены карты повторяемости

барических образований: месячные и периодные. За пятилетие над Западной Сибирью отмечалось 645 циклонов и 332 антициклона. Так, общее число циклонов и антициклонов за год над Западной Сибирью колебалось от 121 (1967 г.) до 137 (1963 г.). Среднегодовое число циклонов составило 129. В течение года общее число циклонов по месяцам колебалось от 3 до 17, а среднемесячное составило 11. За пятилетний период наибольшее число циклонов в году было зафиксировано в марте 1963 г. и мае 1965 г., наименьшее – в декабре 1966 г. При исследовании были отдельно выделены циклоны, проходящие через Западную Сибирь, заполняющиеся на ее территории и возникающие над ней. Согласно этому разделению оказалось, что более трети циклонов (36 % от общего количества) пересекают Западную Сибирь, зарождаясь вне ее территории. Около трети (30 %) циклонов заполняются над нею и 34 % циклонов возникают непосредственно на территории Западной Сибири. Также автором было выявлено отсутствие четко выраженного годового хода распределения числа циклонов, оказывающих влияние на рассматриваемую территорию. Тем не менее, был выделен некоторый максимум в мае и хорошо выраженный минимум в июле и декабре. Июльский минимум был связан с частым повторением в этом месяце синоптических ситуаций, характеризующихся малоградиентным полем. Декабрьский минимум определялся процессами антициклогенеза, вызванными влиянием Азиатского антициклона и развитием приземного антициклогенеза.

В пространственном разрешении Л.И. Бордовской была выделена зона наибольшей повторяемости циклонов, как по среднемесячным, так и среднегодовым значениям. Данная зона в период 1963–1964 гг. располагалась в центральной части Западной Сибири между 65–85° в.д. и 55–65° с.ш.

Кроме циклонов, приходящих на исследуемую территорию с разных направлений, были выделены два обширных очага регенерации и генерации местных циклонов – в районе от Ямала до Обской губы и в междуречье Иртыша и Тобола. Было обнаружено, что за период 1963–1967 гг. над Западной Сибирью образовалось 78 циклонов, причем меньшее их число образовалось зимой (только

11), а летом, и в переходные сезоны (весной и осенью) их образовывалось по 4 циклона ежесезонно [Бордовская].

К.И. Поповой [87] была предпринята попытка классификации барических образований, приходящих на территорию Западной Сибири и оказывающих на нее влияние, в зависимости от отмечающихся погодных условий. Прежде всего, рассматривался температурно-влажностный режим, поле давления, а также циркуляционные особенности того или иного сезона.

В.В. Орловой [82] анализировались различные климатические характеристики Западной Сибири, в том числе влияние циклонических образований на формирование погодного режима территории.

И.П. Прокопьева [89] и Т.С. Ситникова [96] анализировали условия влияния на районы Западной Сибири южных циклонов, а также возможность прогноза их перемещения на данную территорию.

Из более поздних исследований по циркуляции атмосферы можно выделить работы коллектива авторов [36, 38]. Ими был значительно расширен период исследования циркуляционной активности на территории Западной Сибири (1976–2006 гг.) и предложена своя классификация барических образований, оказывающих влияние на исследуемые районы.

Все циклоны были поделены на типы:

1. циклоны, смещающиеся с западной составляющей вдоль 60–65°с.ш.;
2. западные циклоны, образующиеся на волне полярного фронта в районе Свердловска (Екатеринбурга), Омска, Самары;
3. юго-западные циклоны, продвигающиеся из районов Каспийского и Аральского морей;
4. северные циклоны, смещающиеся с северных районов Западной Сибири к югу или с запада на восток вдоль побережья Северного Ледовитого океана;
5. южные циклоны, образующиеся в районе оз. Балхаш и в районах Ашхабада, Ташкента либо в междуречье Амударьи и Сырдарьи;
6. местные циклоны (МЦ), образующиеся в районе междуречья Обь-Иртыш или на юге Западной Сибири;

7. северные циклоны, смещающиеся из районов Кольского полуострова, севера ЕТР и северного Урала.

Авторами проводился анализ тенденций в значениях средних месячных температур воздуха и давления на фоне изменчивости параметров циклонической и антициклонической активности над территорией Западной Сибири за 1976–2006 гг. Причем в ходе исследований было выявлено, что местные циклоны, образующиеся в междуречье Оби и Иртыша, составляют до 20 % [36] от общего количества циклонов, оказывающих влияние на погоду рассматриваемого региона.

Поскольку территория Западной Сибири имеет значительную протяженность как с севера на юг, так и с запада на восток, и пересекает несколько природно-климатических зон, актуально оценить потенциально вероятные территории, на которых можно ожидать влияние местного циклогенеза на основные климатические характеристики, тем более что подобных исследований до настоящего момента не проводилось.

2. АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ ПРОГНОЗОВ БАРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, РАССЧИТЫВАЕМЫХ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

2.1 Анализ полей основных метеорологических величин. Методические аспекты обработки информации

Для понимания динамики изменения погодно-климатического режима территории необходим непосредственный анализ полей метеорологических величин. Для этого используются различные способы статистической обработки информации, например такие как: оценка связи рядов данных и поиск корреляционных зависимостей, оценка экстремальности (минимальные и максимальные значения), поиск средних значений изучаемых величин, а также их отклонений от среднего и другие характеристики. Простейший анализ данных можно произвести с помощью стандартного пакета обработки информации, встроенного в программу Microsoft Excel. Также используются специализированное программное обеспечение, из которого наиболее распространенным является пакет «Statistica».

2.1.1 Оценка связи рядов данных

Среди методов анализа и поиска связи между рядами данных наиболее распространенным является корреляционный анализ [28, 52, 49, 81]. Корреляция (корреляционная зависимость) – статистическая взаимосвязь двух или нескольких случайных величин (либо величин, которые можно с некоторой допустимой степенью точности считать таковыми). При этом изменения значений одной или нескольких из этих величин сопутствуют систематическому изменению значений другой или других величин. Математической мерой корреляции двух случайных величин является корреляционное отношение, либо коэффициент корреляции. В случаях, при которых изменение одной случайной величины не ведёт к

закономерному изменению другой случайной величины, но приводит к изменению другой статистической характеристики данной случайной величины, то подобная связь не считается корреляционной, хотя и является статистической.

Впервые термин «корреляция» ввел в научный оборот французский палеонтолог Жорж Кювье в XVIII веке. Он разработал «закон корреляции» частей и органов живых существ, с помощью которого возможно восстановление облика ископаемого животного, имея в распоряжении лишь часть его останков. В статистике первым стал использовать слово «корреляция» английский биолог и статистик Фрэнсис Гальтон в конце XIX века [49, 52, 100].

Некоторые виды коэффициентов корреляции могут быть как положительными, так и отрицательными. В первом случае предполагается, что можно определить только наличие или отсутствие связи, а во втором – также и ее направление. Если предполагается, что на значениях переменных задано отношение строгого порядка, то отрицательная корреляция – корреляция, при которой увеличение одной переменной связано с уменьшением другой. При этом коэффициент корреляции будет отрицательным. Положительная корреляция в таких условиях – это такая связь, при которой увеличение одной переменной связано с увеличением другой. Возможна также ситуация отсутствия статистической взаимосвязи – например, для независимых случайных величин. Существуют параметрические и непараметрические показатели корреляции.

Среди параметрических показателей корреляции наиболее распространенным является линейный коэффициент корреляции (или коэффициент корреляции Пирсона), который разработали Карл Пирсон, Фрэнсис Эджуорт и Рафаэль Уэлдон в 90-х годах XIX века. Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле 2.1:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}, \quad (2.1)$$

где: cov_{xy} – ковариация двух переменных; σ_x, σ_y – дисперсия переменных; X, Y – значения переменных; \bar{X}, \bar{Y} – среднее значение переменной.

Коэффициент корреляции изменяется в пределах ± 1 . Метод его вычисления зависит от вида шкалы, к которой относятся переменные. Так, для измерения переменных с интервальной и количественной шкалами необходимо использовать коэффициент корреляции Пирсона. Если, по меньшей мере, одна из двух переменных имеет порядковую шкалу, либо не является нормально распределённой, необходимо использовать ранговую корреляцию Спирмена [49].

Простейшим непараметрическим показателем связи является коэффициент, предложенный во второй половине XIX века Г. Т. Фехнером. Данный коэффициент не требует нормальности распределения случайных величин. В основе его вычисления лежит принцип сопоставления отклонений признаков от своих средних значений. Его применение основано на допущении, что отклонения отклика от своей средней величины должно соответствовать отклонению фактора от своей средней величины. Коэффициент Фехнера вычисляется по формуле 2.2:

$$K_f = \frac{C - H}{C + H}, \quad (2.2)$$

где: C – число совпадений знаков отклонений; H – число несовпадений знаков отклонений.

Коэффициент Фехнера может принимать значения от -1 до $+1$. При $K_f = \pm 1$ связь между признаками X и Y функциональная, то есть не случайная, а при $K_f = 0$ связь отсутствует.

Также для анализа связи рядов данных активно используется ранговый коэффициент Спирмена. Главным в данном подходе является то, что каждому показателю X и Y присваивается ранг. На основе полученных рангов рассчитываются их разности и вычисляется коэффициент корреляции Спирмена по формуле 2.3:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (2.3)$$

где d^2 – квадрат разности двух переменных; n – число переменных в ряду данных.

Для более детального анализа рядов данных с привлечением большего количества данных проводится регрессионный анализ [49] сразу по нескольким переменным.

2.1.2 Методы осреднения и экстраполяции данных

Достаточно простым методом выявления тенденции развития является осреднение или сглаживание временного ряда, т.е. замена фактических уровней расчетными, имеющими меньшие вариации, чем исходные данные. Методы осреднения позволяют делать прогнозы, основываясь на среднем значении прошлых наблюдений. Методы сглаживания формируют прогноз, осредняя прошлые данные с учетом уменьшающихся весовых коэффициентов.

В этом методе «простых средних» [52, 49] для создания прогноза на следующий период используется среднее значение всех прошлых наблюдений. Данный метод применим в ситуациях, когда процессы, формирующие временные ряды, стабилизировались, а внешняя среда оказывает незначительное влияние на происходящий процесс. Как только новое наблюдение становится доступным, для прогнозирования на следующий период необходимо учесть и это наблюдение.

При использовании метода простого среднего прогнозирование выполняется на основе осреднения всех существующих данных. Но в некоторых случаях представляют интерес самые последние наблюдения. Тогда можно ограничиться только последними наблюдениями и зафиксировать число точек временного ряда, подлежащих осреднению. Важно отметить, что в этой методике используются только последние k наблюдений (k – ширина окна), а число точек осреднения не изменяется со временем. Здесь всем наблюдениям присваиваются одинаковые весовые коэффициенты, а каждое новое наблюдение включается в среднее по мере его появления при одновременном исключении наиболее старого.

Также для осреднения данных используется экспоненциальное сглаживание (ЭС). По сравнению с методом скользящих средних, где учитываются только

наиболее «свежие» данные, при ЭС используется взвешенное скользящее осреднение всех данных предыдущих наблюдений. ЭС предусматривает постоянное обновление модели за счет наиболее свежих данных. Метод основан на сглаживании временных рядов прошлых наблюдений при присваивании членам ряда определенных весов: последнему наблюдению придается вес α ; предпоследнему – $(1-\alpha)$; третьему от конца ряда – $(1-\alpha)^2$ и т.д. В сглаженном виде новый прогноз для периода времени $t+1$ можно представить как взвешенное среднее последнего наблюдения в момент t и ее прежнего прогноза на этот же период t . Таким образом, ЭС – это старый прогноз с уточнением в виде произведения α на ошибку последнего прогноза. В данном методе принято, что $0 < \alpha < 1$. Постоянная сглаживания α является взвешивающим фактором. Ее реальное значение определяется тем, в какой степени текущее наблюдение должно влиять на прогнозируемую величину. При $\alpha \rightarrow 1$ в прогнозировании существенно учитывается величина ошибки последнего прогноза. При малых значениях α прогнозируемая величина наиболее близка к предыдущему прогнозу.

В ряде случаев данные наблюдений могут иметь заметный тренд, т.е. включают информацию, позволяющую учитывать возможные будущие изменения. В подобной ситуации необходима функция прогнозирования линейного тренда. При наличии во временном ряду тенденции к росту вместе с оценкой текущего уровня необходима и оценка наклона. В методике Хольта (Holt) значения уровня и наклона непосредственно сглаживаются; при этом используются различные постоянные сглаживания для каждого из них: α , β . Эти постоянные позволяют оценить текущий уровень и наклон, уточняя их каждый раз, когда появляются новые наблюдения. Как и при обычном ЭС, постоянные α , β выбираются субъективно или путем минимизации ошибки прогнозирования. Чем большие веса будут взяты, тем большему сглаживанию подвергаются данные. Меньшие веса делают структуру сглаженных значений менее ровной. Для минимизации ошибки прогноза нужно создать сетку значений α и β (т.е. все комбинации $\alpha = 0,1, \dots, 0,9$ и $\beta = 0,1, \dots, 0,9$) и выбрать ту комбинацию, которая дает меньшую величину ошибки.

При наличии в структуре данных еще и сезонной составляющей, кроме тренда и уровня, используется трехпараметрическая модель Винтерса (Winters). Этот метод является расширением метода Хольта, и для учета сезонности вводится дополнительная постоянная сглаживания γ . Как и в предыдущем методе, веса α , β , γ выбираются субъективно или путем минимизации ошибки прогнозирования.

Для восстановления полей основных метеорологических величин в любой точке пространства нерегулярной сетки используется наиболее простой метод линейной интерполяции [8, 24] по двум и более точкам (рис. 2.1), в основу которого положен принцип «весов», то есть оценивается вклад каждой точки окружающего пространства в конечный результат искомого значения величины в расчетной точке.

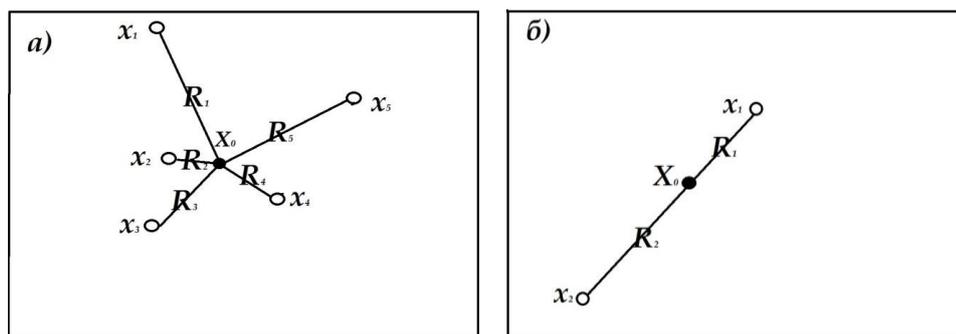


Рис. 2.1. Схема интерполяции значений по нерегулярной сетке

Интерполяция проводится по формуле 2.4:

$$X_0 = \sum_{i=1}^n a_i x_i; \quad a_i = \frac{C}{R_i}; \quad C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n C_i}; \quad C_i = \frac{1}{R_i}, \quad (2.4)$$

где: X_0 – значение метеоэлемента, проинтерполированное в центр циклона; x_i – значение метеоэлемента в i -ой точке; n – число точек; R_i – расстояние от i -ой точки до центра циклона.

2.1.3 Виды анализа, реализуемые в пакете «Statistica». Кластерный анализ

Система «Statistica» является одним из наиболее известных в мировой практике пакетов статистической обработки данных в среде Windows. Разработчиком пакета является фирма Stat Soft, Inc. (США). Данный пакет «Statistica» отличается от большинства других программных продуктов для Windows тем, что состоит из отдельных программ-модулей, каждый из которых содержит конкретный метод обработки данных, например кластерный анализ, регрессионный анализ и т.д. Любой из модулей можно рассматривать как самостоятельную программу, независимую от остальных. Но такие операции, как ввод, корректировка данных, осуществляется в любом из модулей по желанию пользователя. Программа вычисляет практически все используемые описательные статистики общего характера: медиану, моду, квартили, заданные пользователем, процентиля, среднее значение и стандартное отклонение, квартильный размах, доверительные интервалы для среднего, асимметрию и эксцесс (и их стандартные ошибки), гармоническое и геометрическое среднее, а также многие специальные описательные статистики. В модулях системы Statistica доступны разнообразные графики и диаграммы, в т.ч. различные виды диаграмм размаха и гистограмм, гистограммы двумерных распределений (трехмерные и категоризованные), двух- и трехмерные диаграммы рассеяния с помеченными подмножествами данных, нормальные и полунормальные вероятностные графики и графики с исключенным трендом, *K-K* и *V-V* графики и т.д. Имеется набор критериев для подгонки нормального распределения к данным (критерии Колмогорова-Смирнова, Лилиефорса и Шапиро-Уилкса).

Практически все описательные статистики и графики могут быть построены для данных, категоризованных (сгруппированных) по значениям одной или нескольких группирующих переменных.

В системе имеется большой набор методов для исследования корреляций между переменными. Прежде всего, могут быть вычислены все основные

характеристики связи между переменными, в том числе: коэффициент корреляции Пирсона (r), коэффициент ранговой корреляции Спирмена (R), тау (b , c) Кендалла, Гамма, Фи, коэффициент сопряженности (C , D) Соммера, коэффициенты неопределенности, частные и получастные корреляции, автокорреляции, различные меры расхождения и т.д.

В данной программе доступны различные общие параметры графического вывода информации, позволяющие проводить дальнейшее изучение закономерностей и взаимосвязей между переменными; например, двух- и трехмерные диаграммы рассеяния (с метками наблюдений или без них) используются для выявления зависимостей по подмножествам наблюдений или последовательностям переменных. Корреляционные матрицы могут быть категоризованы группирующими переменными и представляться графически в виде категоризованных диаграмм рассеяния.

В дополнение к описательным статистикам и корреляциям и таблицам частот в системе «Statistica» имеются интерактивные средства, позволяющие оперативно вычислять основные статистики и строить графики – это быстрые и блоковые статистики. Также сюда входит полный набор описательных статистик (включая порядковые статистики), корреляции и таблицы частот вместе с ожидаемыми нормальными частотами и другие числовые характеристики, а также большой набор встроенных статистических графиков. Выходные результаты для всех статистик и графиков могут быть сгруппированы по значениям некоторой переменной.

В модуле «Множественная регрессия» встроен полный набор методов линейной и фиксированной нелинейной регрессии. Эти методы включают простую, множественную, пошаговую регрессию (с пошаговым, блоковым включением или исключением предикторов), иерархическую, нелинейную (полиномиальную, экспоненциальную, логарифмическую и т.д.) и гребневую регрессию, с включением или без включения константы (свободного члена), модели взвешенных наименьших квадратов. Программа вычисляет полный набор статистик и дополнительных анализов, включая полную таблицу регрессии (с

значениями стандартной ошибки для B , $Beta$ и свободного члена, коэффициента детерминации (R^2) и скорректированного (R^2) для моделей с константой и без нее и таблицей дисперсионного анализа), матрицы частных и частичных корреляций, корреляции и ковариации коэффициентов регрессии, матрицу выметания (обратную матрицу), статистику Дарбина-Уотсона (d), расстояния Махаланобиса и Кука, удаленные остатки, доверительные интервалы для предсказанных значений и многие другие статистики. В пакете «Statistica» реализован широкий набор методов статистического анализа имеющихся данных, среди которых особое место занимает кластерный анализ.

Впервые данный вид анализа был применен в социологии. Название кластерный анализ происходит от английского слова cluster – гроздь, скопление. В 1939 исследователем Трионом (Tryon) был определен предмет кластерного анализа и сделано его описание. Главное назначение кластерного анализа – разбиение множества исследуемых объектов и признаков на однородные в соответствующем понимании группы или кластеры. Это означает, что решается задача классификации данных и выявления соответствующей структуры в ней. Методы кластерного анализа могут быть применены в самых различных случаях, даже в тех, когда речь идет о простой группировке, в которой все сводится к образованию групп по количественному сходству. Большое достоинство кластерного анализа в том, что он позволяет производить разбиение объектов не по одному параметру, а по целому набору признаков. Кроме того, кластерный анализ в отличие от большинства математико-статистических методов не вводит никаких ограничений на вид рассматриваемых объектов, и позволяет рассматривать множество исходных данных практически произвольной формы. Задача кластерного анализа [49] заключается в том, чтобы на основании данных, содержащихся во множестве X , разбить множество объектов G на m (m – целое) число кластеров (подмножеств) Q_1, Q_2, \dots, Q_m , так, чтобы каждый объект G_j принадлежал только одному подмножеству разбиения. А объекты, принадлежащие одному и тому же кластеру, были сходными, в то время как объекты, принадлежащие разным кластерам, были разнородными.

Кластер имеет следующие математические характеристики: центр, радиус, среднеквадратическое отклонение, размер кластера. Центр кластера – это среднее геометрическое место точек в пространстве переменных. Радиус кластера – максимальное расстояние точек от центра кластера. Кластеры могут быть перекрывающимися. Такая ситуация возникает, когда обнаруживается перекрытие кластеров. В этом случае невозможно при помощи математических процедур однозначно отнести объект к одному из двух кластеров. Такие объекты называют спорными. Методы кластерного анализа можно разделить на две группы: иерархические и неиерархические, каждая из которых включает множество подходов и алгоритмов.

Пакет «Statistica» предлагает несколько методов кластерного анализа. Чаще всего [95] применяют Joining (tree clustering) – группу иерархических методов (7 видов), в случаях, когда число кластеров заранее неизвестно. Эффективно работает с небольшим количеством элементов и нацелен на выбор кластеров с примерно одинаковым количеством членов метод Ward's method (метод Уорда). В качестве измерения расстояния пакет предлагает различные меры, но наиболее употребительными являются Euclidean distance (евклидово расстояние).

2.2 Численные методы и технологии прогноза, используемые синоптиками в оперативной практике

Численные методы прогнозов – это интенсивно развивающееся в настоящее время и перспективное направление в прогностической метеорологии. Основой для таких методов прогноза являются гидродинамические модели атмосферы. По масштабу, а также учету региональных и географических особенностей, модели делятся на глобальные и мезомасштабные. К первым относятся такие модели как GFS – Global Forecast Model (NCEP) [144, 162], ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [146, 160], модель ПЛАВ (Глобальная гидродинамическая полулагранжева модель) [101] и др. Выходные данные таких моделей – это прогностические поля по территории всего земного шара или

полушария, построенные на регулярной широтно-долготной сетке с шагом от 0.25 до 1.2 градуса. Таким образом, максимальное разрешение для шага 0.25 градуса – это около 27 км. В мезомасштабных моделях учитываются региональные синоптические процессы, обусловленные локальными особенностями. К мезомасштабным моделям относятся международная модель COSMO (Consortium for Small-scale Modeling) [2, 9, 155, 157] и WRF (Weather Research Forecasting Model) [64]. Модель WRF – это открытый продукт, подразумевающий полный свободный доступ к исходным кодам модели, постоянную работу сообщества разработчиков по поддержке, обновлению и разработке новых инструментов, что делает ее особенно привлекательной для исследований.

Физико-математические численные модели стали основным средством научных изысканий. Дальнейшие исследования, а также улучшение прогноза погоды и отдельных метеовеличин связывают с использованием более точных прогностических систем и применением многопроцессорной вычислительной техники. Улучшение качества численных моделей атмосферы обуславливают следующие факторы: повышение пространственного разрешения, уточнение начальных полей, совершенствование и использование наиболее эффективных и точных параметризаций.

В России созданы и функционируют разные по масштабу и периоду прогнозов гидродинамические модели [22, 64, 101, 157], а также региональные методы и технологии прогноза отдельных метеорологических элементов [18, 54, 71]. Практическая реализация методов и моделей требует изучения особенностей их работы в регионах Российской Федерации в разные сезоны и при различных погодных условиях, оценки точности прогнозов общего назначения, специализированных, в том числе прогнозов осадков, гроз и других явлений. В оперативной практике синоптиками ЗС УГМС для прогноза погоды используются различные модели, основные из которых – ECMWF (прогноз будущего положения барического поля у поверхности земли и на высоте АТ–500, а также температуры воздуха на уровне АТ–850) и COSMO-RU (прогноз полей облачности и осадков, а также максимальной скорости ветра).

2.2.1 Методы и технологии прогноза метеорологических элементов

В различных регионах России используются методы и технологии расчета отдельных метеорологических величин и явлений погоды [48, 65, 79, 85, 86, 88, 90, 91], как разработанные для всей территории страны, так и локальные, которые учитывают местные особенности формирования погодного режима территории (рельеф, характер растительности, гидрологическую сеть, антропогенные факторы и т.д.). Перспективным направлением в прогнозировании опасных явлений погоды (грозы, града, шквалов) является использование термодинамических индексов неустойчивости атмосферы [56, 57, 109, 121, 141, 158].

На территории деятельности ЗС УГМС и его филиалов внедрены автоматизированные методы и технологии расчета, разработанные в СибНИГМИ и ГМЦ России. Так в отделах метеопрогнозов ГМЦ для прогноза осадков используется технология «WSIBMZ», и зимних осадков для территории Новосибирской области (автор М.Я. Здерева, ФГБУ «СибНИГМИ») [54] и модели ГМЦ России авторов: В. М. Лосева [71], А.Н. Багрова [7], П.П. Васильева [18]. Для прогноза минимальной и максимальной температуры воздуха также используются модели авторов: А.Н. Багрова, П.П. Васильева. Для предупреждения опасных явлений погоды, таких как грозы, используется метод автора Р.А. Ягудина [118, 119], новым методом для прогноза гроз для станций и на окружающей территории радиусом до 300 км является метод автора М.Я. Здеревой [55].

Одним из наиболее трудно поддающихся прогнозированию элементов погодного режима являются осадки. Имеющиеся в оперативной практике методы и технологии в целом справляются с данной задачей [112], тем не менее, прогноз количества осадков оправдывается лучше их факта, а успешность прогноза осадков во времени суток имеет более сложный характер и варьируется от пункта к пункту. В течение года можно проследить увеличение оправдываемости прогноза осадков на большей части территории ЗС УГМС (в равнинной

местности) в зимний период, и только в горных районах Республики Алтай – в летнее время.

Тем не менее, отдельные методы не дают понимания общей картины будущего положения как барических образований (циклонов и антициклонов, барических ложбин и гребней) в целом, так и совокупности полей метеорологических величин (атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, ветра) связанных с ними. Для этого необходимы комплексные модели прогноза погоды различного масштабного разрешения (глобальные, мезомасштабные).

2.2.2 Модель прогноза погоды COSMO-RU

Ограничения в предсказуемости атмосферных процессов и вытекающая из этого необходимость их вероятностного описания были выявлены в работах Э. Лоренца [142, 144] еще в 1960-е гг. Единственным реально осуществимым способом получения таких прогнозов оказалось вычисление некоторого множества численных прогнозов – прогностического ансамбля. Вычисление таких ансамблей в оперативном режиме стало возможным лишь в конце 1980-х – начале 1990-х гг., с развитием мощной вычислительной техники [97]. В это время метеослужбами европейских стран, США, Канады, Австралии, ЮАР, Японии, а также Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) был разработан ряд систем ансамблевого прогноза погоды, преимущественно на основе глобальных атмосферных моделей.

В последнее десятилетие, с дальнейшим развитием вычислительной техники и технологии параллельных вычислений, стала актуальной задача мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды. В настоящее время системы мезомасштабного ансамблевого прогнозирования погоды внедрены и используются в ряде метеослужб Европы и США.

При построении прогностических ансамблей выделяются два основных источника неточностей в прогнозе: погрешности начальных данных

(возникающие из-за погрешностей наблюдений и анализа) и погрешности самой модели (за счет неточности дифференциальной постановки задачи, дискретизации дифференциальных уравнений и неточностей в описании процессов подсеточного масштаба). Прогностический ансамбль, как правило, состоит из невозмущенного (контрольного) прогноза и возмущенных прогнозов, которые называются членами ансамбля. Иногда в качестве членов ансамбля выступают прогнозы нескольких различных моделей (мультимодельный подход). Обычным методом формирования прогностического ансамбля на основе одной модели является внесение искусственных случайных возмущений масштаба обычно возникающих ошибок в начальные данные модели или входящие в ее уравнения эмпирические параметры (параметризации подсеточных процессов). Для построения ансамблей с возмущением начальных данных разработан ряд методов [146, 162, 163], улучшающих воспроизведение в ансамбле наиболее критичных для данного прогноза, т. е. наиболее быстро растущих, ошибок. Для мезомасштабного ансамблевого прогноза существует ещё один метод возмущения начальных и боковых граничных условий – использование различных «материнских» глобальных моделей. Это могут быть как просто несколько различных глобальных моделей (такой подход используется в системе ансамблевого прогноза COSMO-SREPS [145]), так и члены некоторого глобального прогностического ансамбля (система COSMO-LEPS [147]).

Также широко используется возмущение эмпирических параметров и варьирование используемых схем параметризации подсеточных процессов, а также варьирование самих моделей, что позволяет скомпенсировать погрешности моделирования.

Разброс в ансамбле растет со временем, при этом среднее по полученным прогнозам при достаточно большом количестве членов ансамбля и хорошо подобранном возмущении может оказаться точнее, чем результат детерминированного прогноза. На этом и основан полезный эффект от использования прогностических ансамблей. Кроме того, наличие нескольких прогнозов с определенным разбросом на один и тот же срок дает возможность

оценить вероятность тех или иных явлений погоды (например, определенных значений осадков или температуры на заданном уровне), т. е. получить вероятностный прогноз.

Возмущение в ансамбле строится путем изменения используемых в модели вычислительных схем и параметризаций физических процессов. Экспериментальные исследования с заданием возмущений в ансамбле путем варьирования блоков параметризации подсеточных процессов были проведены метеослужбами Италии, Греции и Швейцарии в рамках одной из функционирующих в настоящее время систем мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды на основе модели COSMO – системы COSMO-SREPS [145]. Кроме того, аналогичный подход использовался в разработанной метеослужбой Германии ансамблевой системе конвекционного масштаба COSMO-DE-EPS (шаг сетки – 2,8 км), использующей кроме этого варьирование начальных условий и системы усвоения данных [150]. Ранее варьирование вычислительных схем в проектах мезомасштабного ансамблевого прогноза консорциума COSMO не применялось. В первых экспериментах применялся ансамбль, имевший 24 члена. Они различались выбором вычислительных схем (схема чехарды и схема Рунге-Кутта второго порядка), схем параметризации конвекции (схема Тидтке [161] и схема Кайна-Фрицша [139, 140]), а также различным учетом характерного размера подсеточных термических неоднородностей поверхности и максимального линейного масштаба турбулентных вихрей. По умолчанию в модели последние две характеристики равны 500 м. В первых экспериментах проводился прогноз на 24 часа по данным за 00 часов ВСВ трех дней в мае, июле и октябре 2010 г. В качестве изучаемых ансамблевых прогнозов рассматривались прогнозы общей облачности, суточной суммы осадков, удельной приземной влажности и температуры на высоте 2 м над поверхностью земли. Результаты этих экспериментов показали, что возмущение масштаба турбулентных вихрей вносит лишь небольшой вклад в разброс, возникающий в ансамбле, поэтому в дальнейшем от его использования при выборе членов ансамбля было решено отказаться. Окончательный список включает 28 членов ансамбля.

Для обработки результатов прогноза и его верификации была разработана программа на языке Фортран. С ее помощью возможно определение следующих величин: средний прогноз по ансамблю (медиана прогнозируемых значений членов ансамбля в каждой точке сетки), разброс в ансамбле и прогнозы вероятностей (например, для осадков или температуры) для событий вида «прогнозируемые значения больше или меньше заданного значения». Также вычисляются средний и максимальный разброс в ансамбле, оценка Брайера для вероятностных прогнозов [77], процент точек, фактическое значение в которых оказалось за пределами прогнозируемого диапазона (outliers), подготавливаются диаграммы Талаграна [160], ROC-кривые [76] и диаграммы надежности [136].

Препроцессинг для каждого члена ансамбля выполняется на 16 процессорах, основной счет модели – на 256 процессорах. Таким образом, время выполнения полного ансамблевого прогноза на 78 часов в настоящее время составляет около 7 часов. При работе на 1024 процессорах это время может быть сокращено до 2 часов.

В России развитие систем ансамблевого прогноза погоды до недавнего времени сдерживалось нехваткой необходимой для этого высокопроизводительной вычислительной техники, позволяющей в сжатые сроки проводить расчеты атмосферных процессов на большой территории с высоким разрешением, что особенно важно в случае ансамблевого прогнозирования, для которого требуется одновременный расчет нескольких прогнозов. Тем не менее, уже в 2000-х гг. в Гидрометцентре России была разработана система ансамблевого долгосрочного прогноза [78], а также система глобального ансамблевого прогноза на основе глобальной спектральной атмосферной модели Гидрометцентра России [5]. Системы мезомасштабного ансамблевого прогнозирования погоды до недавнего времени в России не существовало.

Осенью 2009 года [2, 9] Росгидромет вошел как полноправный член в состав консорциума COSMO, а в ФГБУ «Главный вычислительный центр Росгидромета» начал свою работу суперкомпьютер SGI ALTIX 4700 [4]. Все это позволило

использовать в нашей стране в оперативном режиме систему мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU.

Основная цель метеорологического сообщества COSMO – развитие и применение в оперативной практике негидростатической мезомасштабной модели атмосферы COSMO. По правилам консорциума каждая страна-участник к имени модели COSMO добавляет две буквы из имени страны, тем самым указывая на область интегрирования и локальный вариант. По решению Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 13 апреля 2011 года эта система внедрена в оперативную практику в качестве базовой для численного прогнозирования следующих метеорологических величин (полей и метеограмм): осадки, температура и влажность воздуха, фоновый приземный ветер. В состав системы прогноза, как это принято в мировой практике, наряду с моделью атмосферы, входят блоки препроцессинга и постпроцессинга. Обычно результаты прогноза погоды предоставляют потребителям в файлах в коде GRIB и в виде текстовых метеограмм. Это не совсем неудобно для конечных пользователей, так как в этом случае пользователю необходимо каждый раз самостоятельно проводить визуализацию.

Система COSMO-RU работает на суперкомпьютере SGI ALTIX 4700, поэтому результаты прогнозов хранятся на дисковой системе, связанной с суперкомпьютером, доступ к суперкомпьютеру и его дисковой системе имеет ограниченное количество пользователей. Для визуализации и эффективной доставки пользователям результатов прогноза в Лаборатории численного прогноза погоды по ограниченной территории ФГБУ «ГМЦ России» были разработаны соответствующие модули постпроцессинга. Как принято в консорциуме COSMO, для данного механизма обработки информации в системе COSMO-RU используются специальные утилиты [157], причем для визуализации и рассылки результатов прогноза по системе COSMO-RU требуется не более 20 минут, так как все блоки постпроцессинга работают в параллельном режиме.

Основные результаты счёта по модели записываются в коде GRIB в основном с периодичностью 3 часа, начиная с момента прогноза (некоторые поля с периодичностью 1 час). Данные представляются как на уровнях модели (40 уровней для версий модели с шагами сетки 7 и 14 км и 50 уровней для версии с шагом сетки 2,2 км), так и на задаваемых по просьбе пользователей стандартных изобарических и изометрических поверхностях.

В настоящее время разработаны специальные модули для подготовки следующих метеорологических карт, причем этот список постоянно изменяется в связи с предложениями УГМС и других пользователей:

1. давление на уровне моря, облачность среднего яруса, осадки (территория COSMO-RU, Центральный Федеральный округ (ЦФО), Сочи-2014, Урало-Сибирский регион);
2. давление на уровне моря, температура воздуха на высоте 2 м (территория COSMO-RU, ЦФО, Сочи-2014, Сибирь);
3. приземный и максимальный ветер на высоте 10 м (территория COSMO-RU, ЦФО, Сочи-2014, Сибирь);
4. геопотенциал и линии тока на высотах 300, 500, 700 гПа (территория COSMO-RU);
5. порывы, направление и скорость ветра на высоте 10 м (Баренцево, Белое, Каспийское и Чёрное моря).

Для быстрого просмотра изменений по времени метеорологических значений в заданных узлах сетки, система COSMO-RU подготавливает прогноз в виде текстовых метеограмм. Они содержат данные за весь период прогноза с периодичностью 1 час. Период прогноза равен 78 час по данным за сроки наблюдений 00 и 12 ч ВСВ и 48 час – для 06 и 12 ч ВСВ для версий с шагом сетки 7 и 14 км. Для версии с шагом сетки 2,2 км период прогноза равен 24 час, результат выдаётся в кодировке ASCII, а данные доступны к просмотру в обычном текстовом редакторе. Пользователям-синоптикам для простоты и оперативности использования информации табличные данные необходимо изобразить в графическом (более наглядном) виде. Для этого была использована

система GrADS, считывающая данные в бинарном, или в специальном виде. Для предварительного перевода текстовых данных в бинарный вид на языке Fortran-90 была подготовлена специальная программа (convert2bin.exe). Для представления метеограмм в графическом виде для GrADS летом 2009 года был разработан специальный сценарий (скрипт, состоящий из набора внутренних команд операционной системы LINUX).

Итоговые файлы прогноза содержат большое количество метеоэлементов и занимают много дискового пространства (один прогноз на 78 часов для территории COSMO-RU занимает примерно 16 Гб). Для простоты использования прогностической информации был подготовлен перечень файлов необходимых для конкретного пользователя (например, ФГБУ «Научно-производственное объединение Росгидромета «Тайфун» (г. Обнинск), Автономная некоммерческая организация (АНО) «Гидрометеорологическое бюро Москвы и Московской области» и Северо-Западное УГМС (г. Санкт-Петербург, а также другие филиалы Росгидромета). После того, как подготовлена вся прогностическая продукция, осуществляется рассылка тремя различными способами: по протоколу FTP, внутри сети ФБГУ «ГМЦ России» и по электронной почте. Непосредственными пользователями такой продукции в Гидрометцентре России являются оперативные отделы. Специально для них была подготовлена система, которая оперативно доставляет на компьютеры отделов согласованные с сотрудниками этих отделов карты и метеограммы.

В ГМЦ ЗС УГМС (г. Новосибирск) синоптиками отдела метеорологических прогнозов в оперативном режиме в работе используются карты и метеограммы (рис. 2.2), которые непосредственно рассчитываются в ЗС РИВЦ для территории деятельности ЗС УГМС.

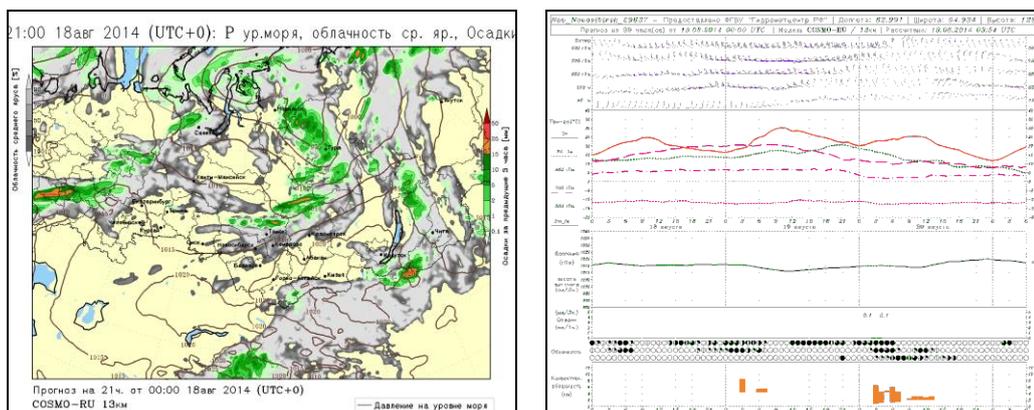


Рис. 2.2. прогностические карты и метеограммы, получаемые системой COSMO-RU

В связи с внедрением самых современных прогностических систем на всей территории России, в том числе в Сибири, стала актуальной оценка их эффективности с целью повышения качества прогнозов погоды и в особенности прогнозов опасных метеорологических явлений [10, 21].

2.3 Анализ модели COSMO-RU с позиции прогноза циклогенеза и его последствий

В настоящее время общая оправдываемость краткосрочных прогнозов составляет 90–97%, при этом прогнозов опасных явлений погоды – 75–90% [112]. Анализ существующих методик прогноза показывает, что их качество для территории России лучше в зимний период. В теплое время года прогнозы имеют несколько меньшую оправдываемость, что связано, в первую очередь, с трудностью выявления механизмов конвективных явлений локального характера (ливневые осадки, шквалы, грозы, град), имеющих ограниченные в пространстве размеры (десятки, сотни километров) и наблюдающихся не продолжительное время (минуты, часы).

В данной части диссертационного исследования проводился анализ прогностических барических полей и полей основных метеорологических величин, представляемых моделью COSMO-RU (далее будем использовать термин «модель») в дни с наличием МЦ.

Осадки – это важная составляющая погодно-климатического режима атмосферы любой территории и сложный элемент для прогнозирования, особенно их интенсивности. В ходе исследований было выявлено, что интенсивные фронтальные осадки прогнозируются с достаточной эффективностью, а внутримассовые, зачастую не поддаются прогнозированию. Это может быть вызвано тем, что внутримассовые осадки чаще всего связаны с влиянием циклонов. Тем не менее, они могут возникать и в других ситуациях, когда создаются достаточные условия для развития конвекции, например, в малоградиентном барическом поле в теплый период года. В настоящее время в прогнозе локальных осадков основной акцент делается на системе «наукастинга» [153], однако для него необходимы дорогостоящие системы трехмерного непрерывного наблюдения за атмосферой с соответствующей технологией обработки наблюдений и прогностическими методами. Вследствие того, что зачастую прогнозы оказываются ошибочными в дни образования и последующего движения МЦ через территорию ЗС УГМС, в том числе, необходим анализ положения основных барических образований в случаях неоправдавшихся прогнозов. В качестве примера рассмотрим прогнозы полей осадков для территории Новосибирской области (НСО).

Материалом для исследований послужили карты будущего положения барических полей для поверхности земли и уровня АТ–500, поля облачности и осадков, рассчитываемые ежедневно моделью в срок 00 ВСВ (с заблаговременностью 24 и 36 часов), а также фактические карты погоды (кольцевые и синоптические карты за основные метеорологические сроки, карты барической топографии для уровня АТ–500 за сроки 00 и 12 ВСВ). Полученные данные сравнивались с фактическими наблюдениями в дни с местными циклонами за 2013–2017 года (123случая).

Из анализа прогностического материала на уровне АТ–500 в дни с низкой оправдываемостью прогнозов, было выявлено, что в большинстве анализируемых случаев (96 %) моделью занижаются значения геопотенциала (в среднем на 8–15 гдм). При совместном изучении также случаев с высокой оправдываемостью

(близкой к 100 %) было выявлено, что занижение значений геопотенциала встречается и в эффективных прогнозах. Это говорит о том, что данная ошибка не является доминантой, носит систематический характер и не оказывает значительного влияния на качество прогноза осадков.

Тем не менее, моделью, в целом, верно (80 %) прогнозируется минимальное приземное давление. Занижение значений на 5–23 гПа (табл. 1) встречается лишь в 15 % и может приводить к «перестраховке» в сторону увеличения количества облачности и осадков. Поэтому необходим учет местных особенностей подстилающей поверхности, в том числе влияния болотных систем, а также корректировка прогностических значений температуры воздуха, так как часто отмечается занижение значений более чем на 5°C. Дальнейшее исследование позволило выявить ситуации (табл. 2.1), при которых модель дает низкую оправдываемость ($\leq 50\%$) прогноза осадков.

Таблица 2.1

Повторяемость различных ошибок в прогнозе барических полей по модели COSMO-RU для территории НСО за 2013–2017 гг.

Вид ошибки		Повторяемость ошибки, %
Неверный прогноз приземного давления	Занижение значений	15
	Завышение значений	5
Неверный прогноз барического поля	На уровне АТ-500	39
	У земли	41
Завышение скорости смещения барических образований		15
Занижение скорости смещения барических образований		6
Влияние синоптических объектов	Холодный фронт	23
	Фронт окклюзии	24
	Теплый фронт	6
	Фронтальная система	6

В дни с местными циклонами в 39 % случаях на уровне 500 гПа, и 41 % у поверхности земли основной из главных проблем модели при прогнозе осадков является неверный прогноз барического поля (Приложение Б). Это происходит, когда прогностическое и фактическое поля противоположны друг другу, интерпретация интенсивности их различна, а также скорости смещения основных

барических образований не соответствуют фактически наблюдаемым. Отметим, что моделью, в основном, занижаются прогностические значения давления у земли (15 %) по сравнению с фактически на 5–23 гПа, только в единичных случаях (5 %) происходило завышение значений приземного на 5–7 гПа.

Второй проблемой является влияние, оказываемое проходящими синоптическими объектами. Чаще всего низкая оправдываемость прогноза осадков отмечается при прохождении фронтов окклюзии (24 %), холодных основных и приземных фронтов (23%), а также теплых фронтов и фронтальной зоны в целом (6%).

Также на успешность прогноза влияет оценка скорости перемещения барических образований. Так в 64 случаях (15%) прогностическая скорость перемещения ложбин и гребней оказалась завышенной и лишь в 26 случаях (6%) произошло ее занижение.

Таким образом, при составлении прогноза осадков прогнозистам следует учитывать выявленные ошибки и критически подходить к анализу прогностического материала.

Согласно «Наставления по краткосрочным прогнозам погоды общего пользования» [80], оценка оправдываемости прогноза осадков производится по их **факту и количеству**. Поэтому представляло интерес проанализировать соотношение этих величин. Для наглядности был рассмотрен один из случаев, когда территория НСО находилась под влиянием одиночного местного волнового циклона, а именно 15 марта 2013 года, когда за срок 12 ВСВ наблюдалась низкая оправдываемость факта и количества осадков соответственно 59,5% и 33,8%.

Из табл. В.1 видно, что на 35 станциях из 37 оправдываемость количества осадков колебалась от 0% до 50%, а оправдываемость факта осадков лишь на 15 станциях составила 0% и это, надо отметить, в худшем варианте. Таким образом, прогнозы факта осадков оправдываются лучше их количества.

Рассмотрим теперь синоптическую ситуацию по модели на 15 марта и фактический материал. Данный циклон образовался в районе между Омском и

Кокчетавом и смещался на северо-восток к Киренску. Период жизни его составил около 2 дней. Наименьшее давление в центре было в интервале 994–1022 гПа.

На уровне АТ–500 (рис. 2.3) прогнозировалось по модели прохождение оси ложбины, градиентная зона, северо-западные потоки, значения геопотенциала 520–536 гдм. Фактически барическое поле оправдалось: над юго-востоком Западной Сибири располагалась ось ложбины, градиентная зона и северо-западные потоки, а прогностические значения геопотенциала оказались ниже фактических на 10–14 гдм, что подтверждает вышесказанное и, следовательно, эти результаты можно исключить из рассмотрения, так как они носят систематический характер.

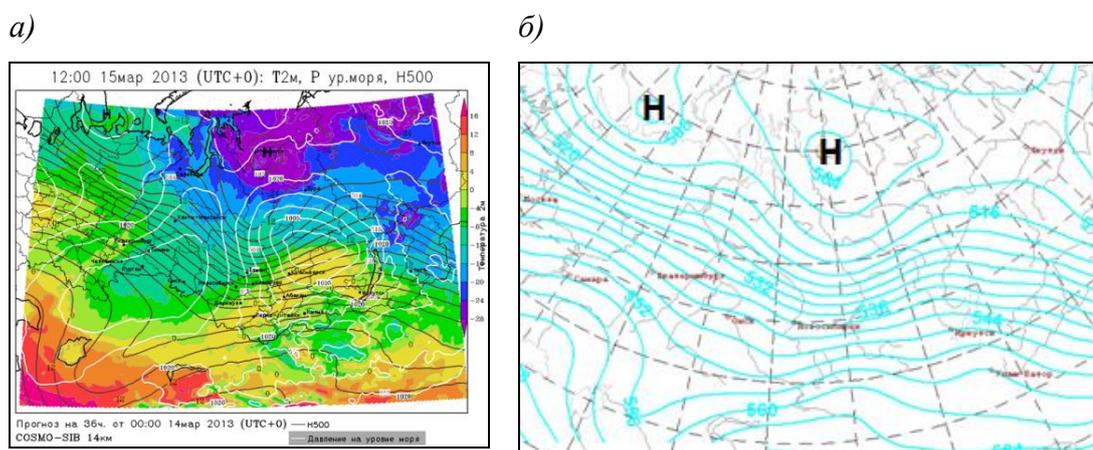


Рис. 2.3. Прогностические (а) и фактические (б) барические поля на уровне АТ–500 в срок 12 ВСВ 15 марта 2013 г.

У поверхности земли (рис. 2.4) по модели прогнозировалось смещение циклона на район Томска, при этом ложбина, связанная с ним располагалась на территории НСО, и повсеместно осадки интенсивностью от умеренных до небольших и следов осадков, кроме крайнего юго-востока, где осадков не ожидалось. Значения давления прогнозировались в интервале 1005–1007 гПа. Фактически же территория НСО оказалась под влиянием восточной части гребня антициклона, в тылу за холодным фронтом циклона, скорость которого оказалась выше прогнозируемой, значения давления составили 1024–1030 гПа. В итоге

практически вся территория Новосибирской области, занятая гребнем антициклона, оказалась без осадков, только лишь на востоке, который был под влиянием ложбины уходящего циклона прошел небольшой и умеренный снег.

Оказалось, что моделью неверно была спрогнозирована скорость смещения циклона и его ложбины, с которыми осадки прогнозировались почти повсеместно, она оказалась ниже фактической, поэтому осадки были лишь на востоке, где еще сказывалось влияние ложбины. При этом значения приземного давления были занижены на 19–23 гПа, что является существенной ошибкой, так как допустимое отклонение составляет не более 2 гПа.

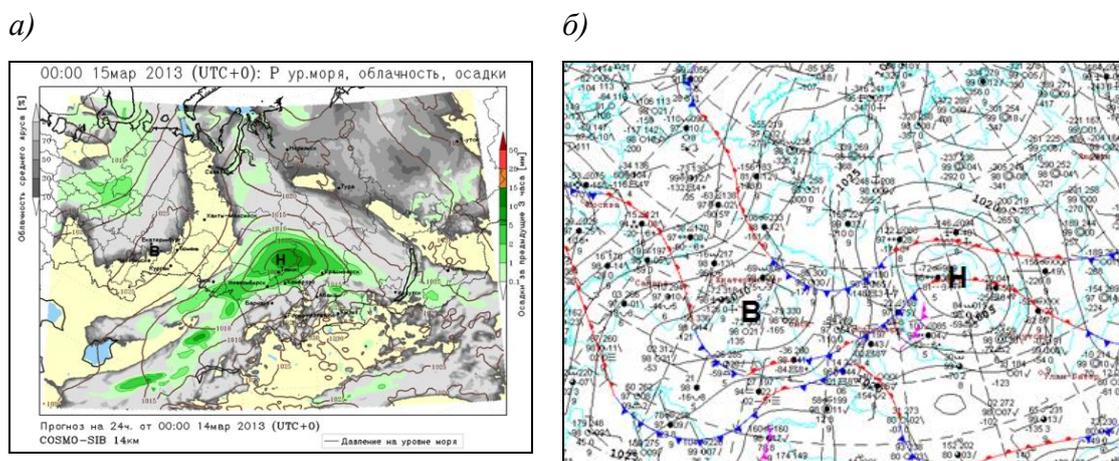


Рис. 2.4. Прогностические (а) и фактические (б) барические поля у поверхности земли за срок 12 ВСВ 15 марта 2013 г.

Далее представляло интерес то, как оправдывается прогноз осадков (общий прогноз и прогноз факта и количества осадков отдельно) применительно для отдельного пункта, а также сравнить полученные результаты с оправдываемостью оперативных прогнозов синоптиков отдела метеорологических прогнозов ГМЦ ЗС УГМС.

Оценка была произведена для метеорологической станции Учебная города Новосибирск. В качестве анализируемого был выбран период с января по март 2014 года, включающий в себя 79 дней за сроки 00 и 12 ВСВ, то есть всего 178 случаев. Низкая оправдываемость (50% и менее) наблюдалась в 50 случаях (по 27,

13 и 10 в январе, феврале и марте соответственно), что составляет около 28 % от общего количества рассмотренных случаев. В оперативных прогнозах доля неэффективных была значительно ниже (6%) и наблюдалась в 11 случаях. Из табл. 2.2 видно, средняя за три месяца оправдываемость модельных прогнозов количества осадков несколько выше их факта (около 78 и 74% соответственно), оправдываемость же оперативных прогнозов значительно превышает данные показатели (около 96 и 94 % соответственно).

Таблица 2.2

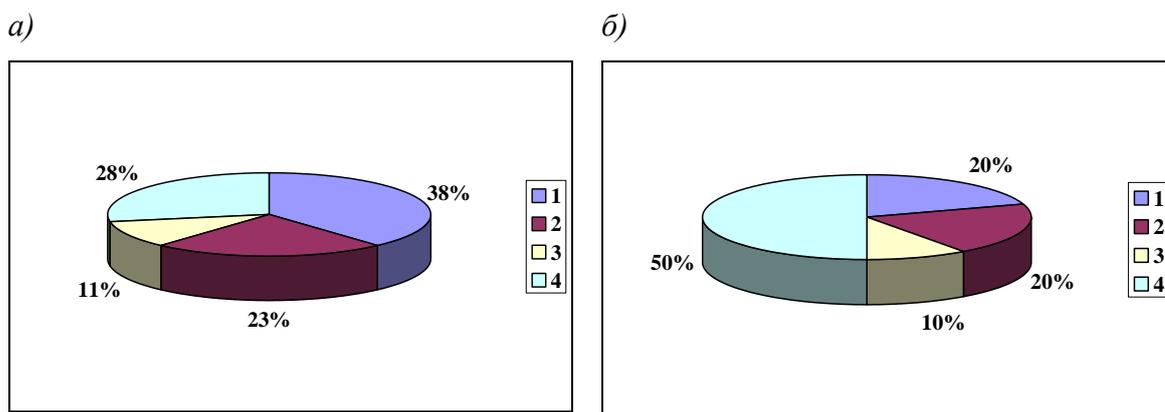
**Оправдываемость модельных и оперативных прогнозов осадков для станции
Учебная (г. Новосибирск) за январь–март 2014 г.**

Оправдываемость, %							
0:00 ВСВ				12:00 ВСВ			
COSMO-RU		Оперативный		COSMO-RU		Оперативный	
Факт	Количество	Факт	Количество	Факт	Количество	Факт	Количество
77	79	94	94	71	76	94	97

Также были выявлены наиболее типичные ошибки в модельных прогнозах осадков (рис. 2.5). Чаще всего (38%) происходит «перестраховка», то есть когда модель прогнозирует осадки, которые фактически не отмечаются, либо наоборот, когда осадки не прогнозируются (23%), но регистрируются метеостанциями.

Нередки случаи занижения моделью интенсивности выпадающих осадков (28%). Причем замечено, что чаще всего (75%) данные ошибки отмечаются в дни с наличием МЦ, что может говорить об их существенном влиянии на степень успешности прогнозов погоды, особенно осадков. В холодный и теплый периоды процент неэффективных прогнозов выше по сравнению с переходными сезонами.

Далее для подтверждения полученных выше результатов рассмотрим эффект влияния на погоду анализируемого региона МЦ другого генезиса на примере формирования сразу нескольких циклонов, смещающихся серией 26–28 марта 2014 года, оказывающих влияние на территорию Западной Сибири в течение трех суток. В этот период отмечалась максимальная разница в прогностическом и фактическом положении сформировавшихся центров (около 500 км).



1 – «ложный» прогноз, 2 – непредусмотренные осадки,
3 – количество больше факта, 4 – количество меньше факта

Рис. 2.5. Виды ошибок прогноза (из числа неоправдавшихся прогнозов) осадков в дни циклогенеза: а) COSMO-RU (46); б) оперативный (10)

В 00–06 ВСВ 26 марта у поверхности земли в обширной ложбине основного циклона (с центром в районе Туры) на волне арктического фронта образовался циклон в районе между городами Ханты-Мансийск и Александровское (рис. 2.6а), минимальное давление в центре составило 1007,4 гПа. Данный циклон углублялся, смещаясь на восток и юго-восток, (минимальное давление 1005 гПа) и расширялся по площади на запад и восток, затем произошло его разделение на два центра: один в районе Ханты-Мансийска, второй в районе Александровского. К 18 ВСВ 26 марта восточный центр заполнился, а западный продолжил углубляться (1004,6 гПа) и опускаться на юго-восток на районы города Колпашево (12 ВСВ 27 марта), далее он продолжил приподниматься на северо-восток, на районы Туры, где достиг наибольшей интенсивности (минимального давления в центре 987,3 гПа). Затем он начал заполняться и к 12 ВСВ 28 марта уже не имел замкнутой изобары в центре.

По данным модели (расчет от 12 ВСВ 25 марта) к 00-06 ВСВ 26 марта у поверхности земли отмечалось только углубление и распространение ложбины основного циклона (с центром восточнее Туры) на запад на районы городов Ханты-Мансийск и Александровское. Формирование местного циклона произошло в районе между Тюменью и Майском (запад Томской области) только к 21 ВСВ 26 марта (рис. 2.6б). Замкнутая изобара имела значение 1005 гПа. Затем

он начал смещаться на восток через северные районы Томской области, достигнув стадии максимального развития с минимальным давлением в центре 990 гПа. Далее траектория смещения циклона лежала на северо-восток, на север Иркутской области, где он заполнился и к 12 ВСВ 29 марта не имел уже замкнутой изобары в центре.

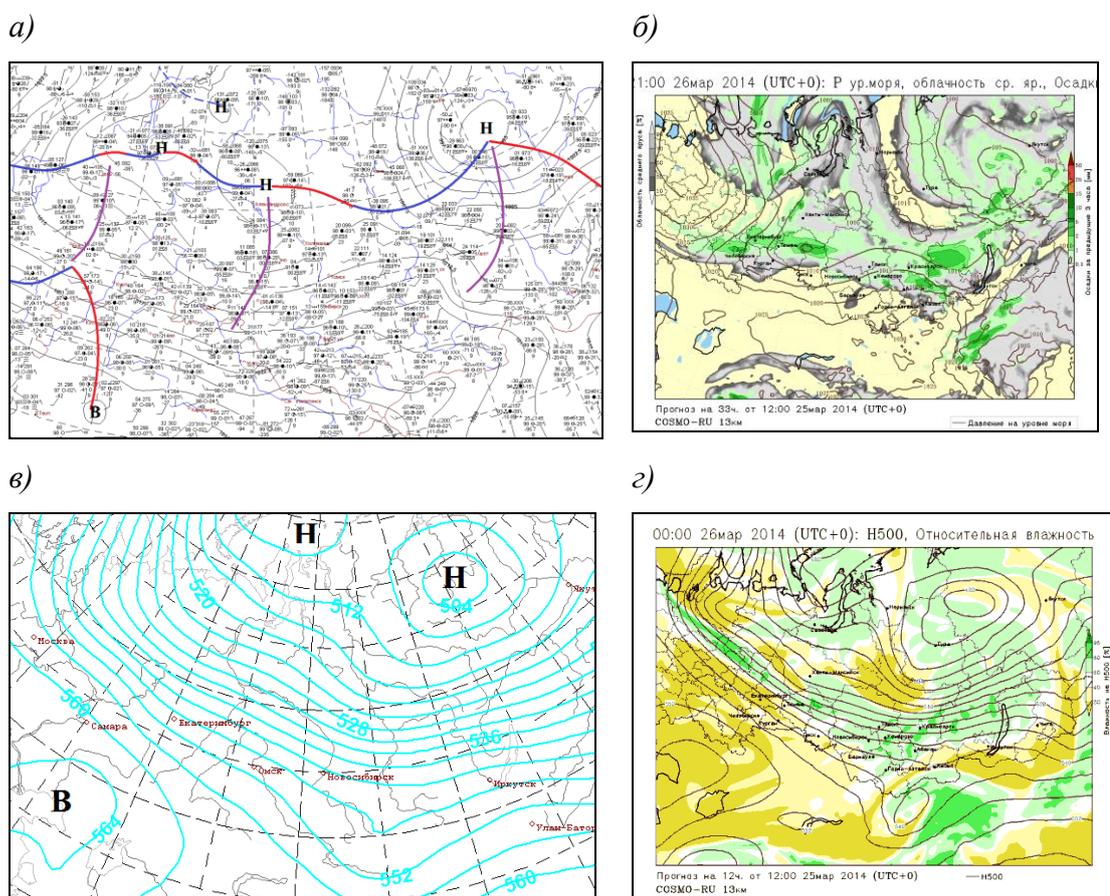


Рис. 2.6. Барические поля у поверхности земли:

а) фактическое (06 ВСВ 26.03.2014 г.), *б)* COSMO-RU (21 ВСВ 26.03.2014 г.);

Барическое поле на уровне АТ–500 (00 ВСВ 26.03.2014 г.):

в) фактическое, *з)* COSMO-RU

Фактически на уровне АТ–500 (рис. 2.6в) с 12 ВСВ 25 марта по 12 ВСВ 26 марта исследуемая территория находилась под влиянием обширной ложбины двух циклонов с центрами в районе города Норильска и о. Новая Земля. Через территорию ЗС УГМС проходила градиентная зона с активным западно-

восточным переносом. В период с 12 ВСВ 26 по 00 ВСВ 28 марта в этой ложбине образовались два центра низкого давления: первый – в районе Салехарда (508 гдм); второй – в районе Подкаменной Тунгуски (512 гдм). К 12 ВСВ 28 марта ложбина продолжила углубляться на запад и немного опускаться к югу, заняв обширное пространство на широте от Москвы до Якутска.

По прогностическим данным на уровне АТ–500 (рис. 2.6а) с 12 ВСВ 26 марта по 12 ВСВ 27 марта север Сибири занимала обширная двухцентровая депрессия: первая над Карским морем, вторая северо-восточнее Туры. Оба центра имели замкнутую изогипсу в значении 492 гдм, они прокручивались и слабо опускались на юго-восток без изменения интенсивности. Только к 00 ВСВ 28 марта в ложбине западного циклона образовался свой локальный центр низкого давления (500 гдм) над районами Подкаменной Тунгуски, который быстро заполнился к 12 ВСВ 28 марта и влился в ложбину восточного центра циклона. На территорию ЗС УГМС оказывала влияние градиентная зона.

Было выявлено, что по модельным данным произошло запаздывание развития МЦ более чем на 12 часов. Наблюдалась значительная (на 500 км севернее) разница в положении фактических и прогностических центров образующихся циклонов у поверхности земли. На уровне АТ–500 модель не смогла предсказать образование новых циклонов, и смещала лишь центры основных циклонов.

В ходе анализа прогностических полей модели COSMO-RU получено:

1. В целом качество прогноза формирования МЦ по модели COSMO-RU оценивается как удовлетворительное, а предупрежденность факта формирования составила 67 % (табл. 2.3). Тем не менее, в 72 % случаев было неверно спрогнозировано местоположение циклонических вихрей. Фактические районы генерации циклонов чаще всего (62%) оказываются значительно севернее прогностических (максимальное расстояние 300–500 км), а в 38 % случаев южнее. Все это может значительно снижать эффективность прогноза полей основных метеорологических величин, особенно осадков на севере исследуемой территории в холодный период, а на юге – в теплый.

2. Моделью в большинстве случаев (67 %) неверно прогнозируется продолжительность «жизни» МЦ. Присутствует как занижение, так и завышение показателей на 1–3 дня. При занижении продолжительности «жизни» местного циклона модель не улавливает глубины ложбины (разница более чем на 5 гПа) и ее протяженности. Она прогнозирует лишь наличие отдельного быстро заполняющегося в течение суток МЦ, при этом фактически отмечается образование целой серии циклонов, «живущих» около 3 дней. Более длительный (на 1–2 дня) период воздействия местного циклона на территорию модель прогнозирует при наличии активной барической пары на фоне повышенных контрастов между воздушными массами. Фактически отмечается однородное поле пониженного давления, без значительных контрастов температуры и давления. В 56 % случаев прогнозируется более позднее (на 1 день) образование МЦ. В 59 % случаев моделью неверно описывалось прохождение через анализируемую территорию фронтальных разделов, в особенности холодных фронтов и фронтов окклюзии. Это также может быть следствием наличия ошибок в интерпретации интенсивности и конфигурации основных циклонов и их ложбин.

3. Тем не менее, моделью, в целом, верно (80 %) прогнозируется минимальное приземное давление. Занижение значений на 5–23 гПа (табл. 1) встречается лишь в 15 % и может приводить к «перестраховке» в сторону увеличения количества облачности и осадков. Поэтому необходим учет местных особенностей подстилающей поверхности, в том числе влияния болотных систем, а также корректировка прогностических значений температуры воздуха, так как часто отмечается занижение значений более чем на 5°C.

4. В 15 % случаев модель не спрогнозировала формирование местных циклонов на уровне 500 гПа. Возможно, это связано с неверным прогнозом профилей метеоэлементов, особенно температуры воздуха, происходящем во всей толще тропосферы во время циклогенеза.

5. В дни с МЦ общая оправдываемость прогноза осадков может падать до 50 % и ниже. При этом качество модельных прогнозов значительно уступает

оперативным, так как у них чаще всего (48 %) отмечается «перестраховка», то есть когда осадки прогнозируются, но не отмечаются фактически. В оперативных прогнозах в половине случаев прогнозируемое количество осадков оказывается меньше фактически наблюдаемых.

Таблица 2.3

Матрица сопряженности прогноза и факта образования местных циклонов (МЦ) в 2013–2017 гг.

Прогноз, случаев	Факт, случаев	
	МЦ образовался	МЦ не образовался
Дано образование МЦ	67	81
Образование МЦ не дано	34	10
Предупрежденность факта образования МЦ, %	67	
Предупрежденность отсутствия МЦ, %	11	

Таким образом, местный циклогенез, чаще всего неверно отражается в имеющихся в оперативной практике модельных схемах прогноза барического поля, что сказывается на оправдываемости полей основных метеорологических величин, особенно осадков. Поэтому, наряду с совершенствованием систем наблюдения за атмосферой, технологий обработки наблюдений и прогностических методов, также необходим анализ механизмов формирования местных циклонов с учетом совокупности синоптических, орографических и энергетических особенностей различных районов Западной Сибири. Такое исследование позволит ответить на множество вопросов, возникших во второй главе.

3. ЦИКЛОГЕНЕЗ В ЦЕНТРЕ И НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

3.1 Идентификация местных циклонов

Для идентификации и анализа процессов образования, трансформации и движения, как мезоциклонов, так и циклонов большего масштаба, необходимо понимать механизмы и особенности их формирования над различными территориями и районами, в той или иной синоптической ситуации. Это позволит провести классификацию циклонов, образующихся в центре и на юге Западной Сибири (местных циклонов), по различным признакам для дальнейшего выделения групп циклонов, значительно отличающихся друг от друга и по-разному влияющих на погоду и климат региона.

Чаще всего проводят синоптический анализ атмосферных явлений на основе различных погодных карт, таких как синоптические и кольцевые карты, а также карты барической топографии. В дополнение к имеющейся информации могут также привлекаться данные спутникового мониторинга [69, 70].

В оперативной практике циклоны предсказываются синоптиками по ряду (наиболее благоприятных условий) признаков [23]:

- 1) при перемещении воздушной массы с севера на юг;
- 2) при наличии дивергенции (расхождение) изогипс на картах абсолютной топографии (АТ) средней тропосферы;
- 3) при уменьшении скорости вертикальных движений при переходе из теплой воздушной массы в холодную;
- 4) при увеличении скорости ветра с высотой;
- 5) при наличии больших контрастов температуры во фронтальной зоне;
- 6) при адвекции холода в тыловой части возникающего вихря;
- 7) при малой шероховатости подстилающей поверхности, уменьшающей турбулентное трение.

В малоградиентном поле в условиях неоднородного нагрева воздуха от подстилающей поверхности вблизи оси высотной ложбины под ее передней

частью могут возникать термические (местные) циклоны. При вовлечении в систему циркуляции данного циклона атмосферного фронта (обычно холодного, реже теплого) он превращается во фронтальный. Зарождение и развитие атмосферного вихря возможно при наличии значительных энергетических запасов доступной потенциальной и кинетической энергий, которые наблюдаются под дельтой Высотной фронтальной зоны (ВФЗ) и вблизи струйных течений.

3.1.1 Циклоны, выраженные в барическом поле

Местный циклогенез (из метеорологического словаря) – образование или усиление циклонов и антициклонов под воздействием температурных условий подстилающей поверхности. Области пониженного давления возникают или усиливаются над более нагретыми участками подстилающей поверхности, относительно окружающего пространства; области высокого давления – над участками более холодными. Этот местный механизм циклогенеза большей частью является дополнительным к основному, фронтальному механизму образования циклонов и антициклонов.

Для анализа характера циркуляции над Сибирью были использованы приземные синоптические карты за основные метеорологические сроки (00, 06, 12 и 18 ВСВ) за 1976–2007 гг., приземные кольцевые карты погоды (за сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 ВСВ) за 2008–2017 гг., а также карты барической топографии из архива фонда данных ЗС РИВЦ.

В качестве МЦ рассматривалась область пониженного давления при наличии хотя бы одной замкнутой изобары с характерной циркуляцией и структурой метеорологических полей. Рассматривались только те барические образования, которые обнаруживались на кольцевых картах погоды не менее четырех соседних сроков, а на приземных синоптических картах не менее двух сроков (Г.1).

Для данных циклонов оценивались такие характеристики как: их число, среднее давление в центрах и продолжительность влияния на исследуемую

территорию. Сопоставлялись результаты анализа приземных синоптических, кольцевых карт погоды с картами барической топографии.

Для циклонов исследовались следующие формальные признаки: характер синоптической ситуации, на фоне которой они образуются; интенсивность и степень развития, район локализации центра; траектории смещения; высота развития в толще атмосферы (для выявления степени вертикального развития циклонов), а также сезонная составляющая циклогенеза.

Вследствие того, что рассматриваемая территория (50–64°с.ш. и 60–90°в.д.) занимает обширные пространства (от Сибирских Увалов на севере до степей юга Сибири и севера Казахстана на юге, от Уральских гор на западе до Среднесибирского плоскогорья и гор Алтая на востоке), это, в свою очередь, определяет наличие над различными ее районами разных условий для формирования и развития местных циклонов: диаметр, интенсивность и продолжительность жизни, высота (степень вертикального развития) и пр.

Поскольку выявлено значительное количество ошибок в модельных прогнозах локализации центров МЦ, рассматриваемая территория (Приложение А) была разделена на три части [113]: болотистый север территории (60–64°с.ш., 60–90°в.д.); центральные районы, где расположено Большое Васюганское болото (54–60°с.ш., 60–90°в.д.) и юг, где болотные системы отсутствуют (50–54°с.ш., 60–90°в.д.).

По причине наличия ошибок в прогнозах начала и окончания формирования МЦ, а также **продолжительности их влияния**, они были поделены на три группы [104]:

І группа – циклоны с продолжительностью «жизни» до одних суток;

ІІ группа – циклоны, «живущие» 2–3 дня;

ІІІ группа – циклоны, продолжительность «жизни» которых составляет 4–6 дней.

По **характеру синоптической ситуации**, господствовавшей над Западной Сибирью во время местного циклогенеза, было выделено 4 основных типа циклонических вихрей [104]:

первый тип – циклоны, образовавшиеся на волнах фронтальных систем;
второй тип – несколько образовавшихся одновременно, или поочередно заполняющихся и вновь образующихся циклонов (серия волновых циклонов);
третий тип – циклоны, образовавшиеся на вторичных (приземных) фронтах;
четвертый тип – другие циклоны.

МЦ, как правило, представляют из себя мезомасштабные барические образования (с радиусом 300–500 км), в отдельных случаях они могут развиваться в объекты синоптического масштаба (с радиусом более 1000 км), становясь основными циклонами. При этом в подавляющем большинстве случаев происходит образование новых циклонов, а регенерация старых (заполняющихся) циклонов отмечается крайне редко (менее 1 %).

Было выявлено, что чаще других над территорией юго-востока Западной Сибири формируются циклоны на волнах фронтальных систем, так называемые волновые циклоны (в 52 % случаев). В качестве примера для данного типа циклонов рассмотрим вихрь, образовавшийся на севере территории на волне арктического фронта над районами Ханты-Мансийска 17 февраля 2014 г. в 06 ВСВ (рис. 3.1а). Он смещался со скоростью около 30–40 км/час в восточном направлении, задевая северные районы Томской области, а также центральные районы Красноярского края. К 21 ВСВ 18 февраля циклон достиг стадии максимального развития (минимальное давление в его центре составило 992,6 гПа) после чего началось его окклюдирование. Продолжая свое движение на северо-восток, вихрь стал холодным высоким барическим образованием и полностью заполнился над южными районами п-ова Таймыр к 09 ВСВ 20 февраля. Таким образом, данный МЦ оказался «долгоживущим», просуществовав около 4 суток.

На втором месте по повторяемости (в 22 % случаев) встречаются циклоны, образовавшиеся также на волнах фронтальных систем и смещающиеся сериями. Это происходит, когда за небольшой период времени возникают несколько циклонов, которые могут заполняться и образовываться вновь. На рис. 3.1б приведен пример образования двух волновых циклонов, которые сформировались

в 18 ВСВ 24 декабря 2015 г. над южными районами Томской области (центральные районы исследуемой территории) в передней части вытянутой ложбины циклона, располагающегося над южным Уралом. Минимальное давление составило 1001,6 и 1002 гПа соответственно для западного и восточного центров. Данные мезовихри смещались на восток со скоростью около 30 км/ч и, просуществовав около 3 суток, полностью заполнились к 03 ВСВ 26 декабря над районами Красноярска.

Циклоны, образующиеся на приземных (вторичных) фронтах и циклоны другого генезиса (основное количество из которых представляют циклоны, образовавшиеся в ложбине основной барической депрессии, значительно реже – малоподвижные циклоны) встречаются в 13 % случаев каждый.

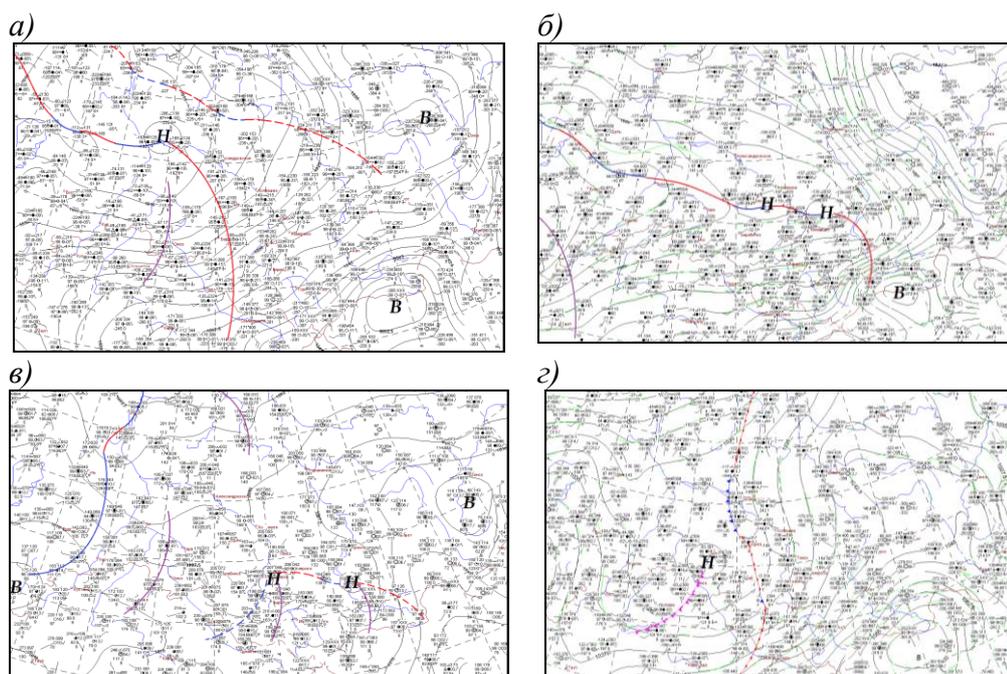


Рис. 3.1. Типы местных циклонов: а) волновой, образовавшийся в 06 ВСВ 17 февраля 2014 г.; б) – серия волновых, образовавшихся в 18 ВСВ 24 декабря 2015 г.; в) на приземных фронтах, образовавшиеся в 12 ВСВ 25 июня 2014 г.; г) в ложбине основного циклона, образовавшиеся в 03 ВСВ 13 февраля 2016 г.

На рис. 3.1в приведен пример образования двух циклонов на приземных фронтах. Они сформировались в южной части исследуемой территории в 12 ВСВ

25 июня 2014 г. в малоградиентном поле пониженного давления, западный центр над районами Новосибирска–Барнаула, восточный – над Красноярском, при этом основная система фронтов проходила значительно западнее и севернее. К 03 ВСВ 26 июня произошло объединение этих центров в одну общую депрессию, минимальное давление при этом составило 1001,6 гПа. Смещаясь в восточном направлении со скоростью около 15–20 км/ч, циклон, пройдя все этапы своего развития в течение 2 суток, заполнился над районами Байкала к 12 ВСВ 27 июня.

На рис. 3.12 приведен пример МЦ, образовавшегося в ложбине основного циклона над районами Омска в 03 ВСВ 13 февраля 2016 г. Данный мезоциклон сформировался в относительно повышенном поле давления (минимальное давление в его центре составило 1031 гПа) вследствие выноса порции теплого воздуха с районов Казахстана и имел внутримассовый характер. При смещении на юг произошло его полное заполнение в течение одних суток к 03 ВСВ 14 февраля.

3.1.2 Циклоны, выраженные в поле облачности

Снимки облачного покрова [3, 14, 15, 70, 99] используются специалистами при прогнозе синоптического положения, эволюции барических образований, облачности и явлений погоды. Они имеют важное значение при анализе состояния погоды над морями и океанами, а также районами с редкой сетью метеорологических станций. Особенно актуальна спутниковая информация для составления прогноза возникновения, эволюции и перемещения циклонов различного происхождения.

Для оценки характера циркуляции над Сибирью были привлечены результаты спутникового зондирования на основе данных космических аппаратов Terra и Aqua, являющихся частью комплексной программы NASA EOA (Earth Observing System), направленной на исследование Земли и состоящей из трех специализированных спутников Terra, Aqua и Aura, предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно.

Одним из ключевых инструментов американских спутников серии EOS является спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). MODIS, установленный на спутниках Terra и Aqua, имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК диапазонах, и позволяет производить регулярную съемку одной территории с пространственным разрешением до 250 м 2 раза в сутки.

Область применения данных дистанционного зондирования, полученных со спектрорадиометра MODIS:

- мониторинг облачного покрова, концентрации взвешенных частиц (аэрозолей), распределения водяного пара в атмосфере, мониторинг опасных атмосферных явлений;
- мониторинг ледовой обстановки, половодий, паводков;
- мониторинг температурного режима океана. Анализ распространения и динамики размещения фитопланктона в целях определения биопродуктивности океана;
- оперативное автоматизированное выявление очагов лесных пожаров;
- определение и мелкомасштабное картографирование биопродуктивности лесных массивов и сельскохозяйственных угодий.

Использование снимков облачного покрова позволяет определить тенденцию развития синоптического процесса, обнаруживающегося в поле облачности раньше, чем ее признаки будут заметны в поле температуры и давления. Фронтальная облачность напрямую связана с циклонической деятельностью. Известно [3], что возникновение на квазистационарном фронте волны сопровождается деформацией термобарического поля. Теплый воздух получает тенденцию двигаться в сторону холодного, давление у гребня волны начинает понижаться. Это способствует развитию здесь циклонической циркуляции, сопровождающемуся преобразованием фронтальной облачной системы.

Если в начальный момент фронтальная облачность представляет собой довольно ровную полосу шириной 200–300 км и длиной 1000–2000 км, то

возникающая на фронте волна приводит к сильной деформации облачной полосы. На начальной стадии формирования циклона впереди волны формируется зона слоистой облачности, которая расширяется в сторону холодного воздуха, а в тыловой части фронтальная облачная полоса становится уже и выгибается в сторону теплого воздуха (рис. 3.2а).

Развиваясь, фронтальная волна превращается в молодой циклон, происходит дальнейшая деформация фронтальной облачной полосы, образуются две облачные спирали, которые сходятся в вершине волны и соответствуют теплому и холодному участкам фронта (рис. 3.2б). Процесс окклюдирования циклона приводит к смыканию облачных спиралей теплового и холодного фронтов и образованию облачной системы фронта окклюзии, которая удлиняется и плавно переходит в облачную спираль холодного фронта. Облачная спираль теплового фронта частично поглощается облачной спиралью фронта окклюзии, а частично размывается в процессе вытеснения теплого воздуха вверх (рис. 3.2в,г). Данная последовательность в развитии облачной системы отмечается у всех циклонов, возникающих из волновых возмущений на полярных или арктических фронтах.

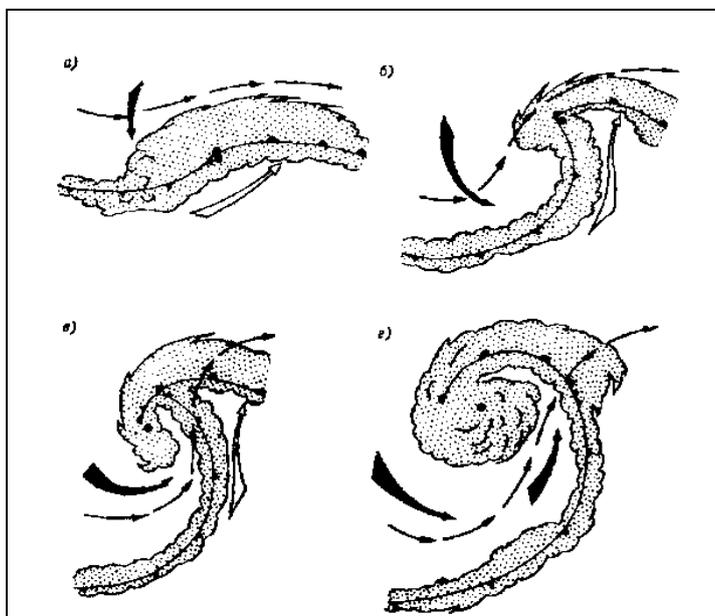


Рис. 3.2. схема развития облачной системы циклона

Всего выделяют пять основных облачных форм, являющихся предвестниками образования циклонов умеренных широт (рис. 3.3):

1. облачная шапка фронтальной волны – волновой прогиб фронтальной облачной зоны и появление в передней части полос перистых облаков;
2. шапка (щит) перистой облачности с резким, обычно выпуклым к северу, краем;
3. шапка (веер) перистых облаков на северном конце гряды облаков холодного фронта;
4. массив развивающихся кучевых облаков;
5. вторичный облачный вихрь.

Все пять представленных типичных облачных ситуаций являются не только признаком циклогенеза, но и признаком активного развития уже существующего циклона.

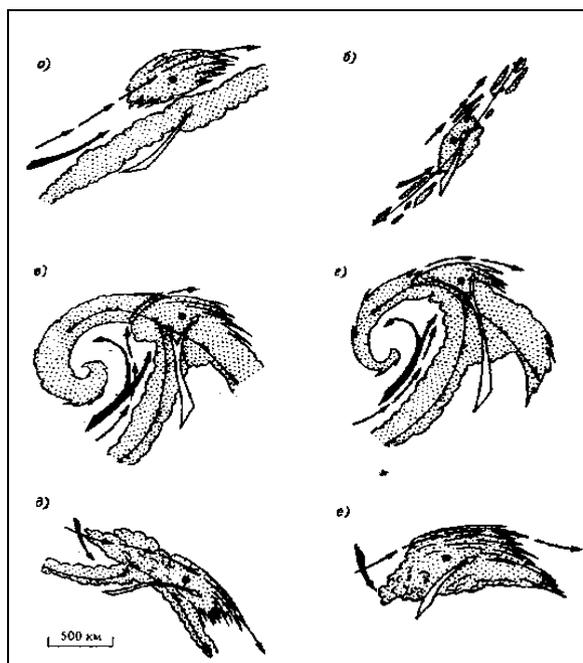


Рис. 3.3 – Облачные формы, являющиеся предвестниками образования циклона

В ходе настоящих диссертационных исследований рассматривались снимки облачности в случаях наличия местных циклонов, выраженных в барическом поле у поверхности земли. По результатам мануального трекинга все облачные вихри,

соответствующие МЦ в приземном поле, были поделены на две основных формы: внутримассовые (рис. 3.4а,б) и фронтальные (рис. 3.4в,г).

Были выделены следующие прогностические признаки идентификации МЦ в поле облачности:

1) Внутримассовые циклоны [3] на телевизионных и ИК снимках выглядят в виде отдельного облачного вихря (в форме «запятой») облачная полоса которого лежит южнее основного фронта. Образуются при блокировании южной части высотной ложбины.

2) Фронтальные циклоны на космических снимках облачности обнаруживаются по уплотнению и расширению облачной полосы основных фронтов на участке длиной несколько сотен километров, которая приобретает антициклоническую кривизну, вгибаясь в сторону холодного воздуха. Образуются, как правило, в тыловой части основных фронтальных систем.

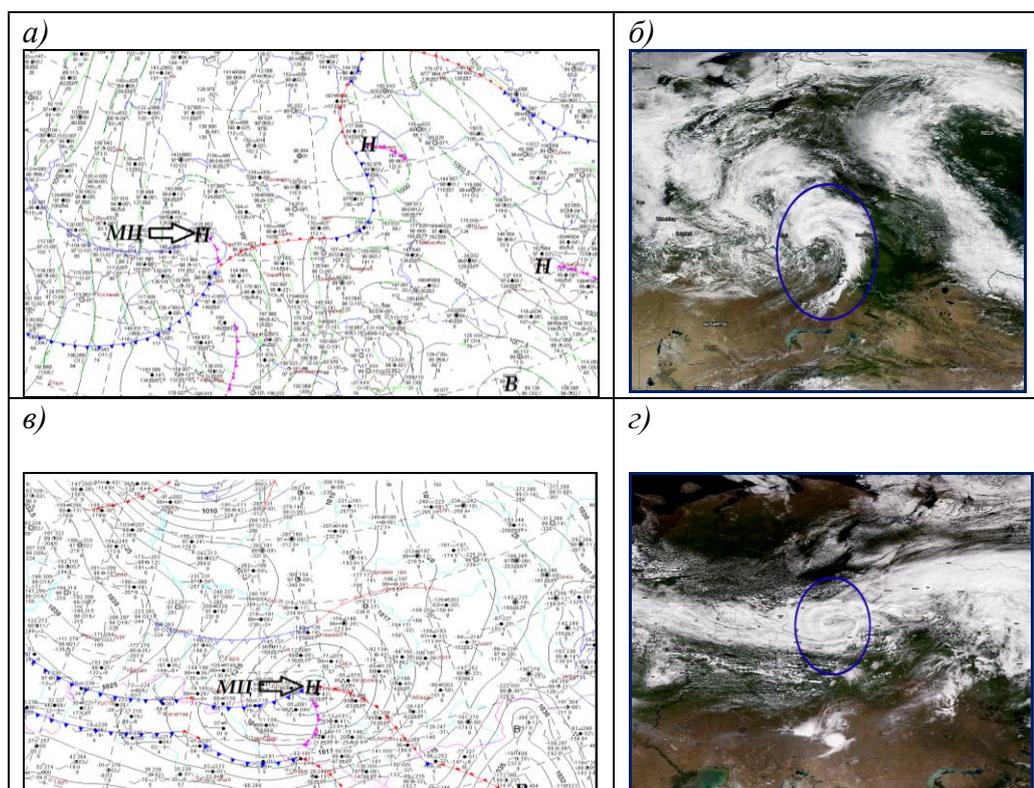


Рис. 3.4 Местные циклоны: внутримассовый (27.07.2015) а) на кольцевой карте, б) в поле облачности; фронтальный (10.11.2016): в) на кольцевой карте, г) в поле облачности

3.2 Характеристики циклонов, образовавшихся в междуречье Обь-Иртыш

Образовавшиеся в междуречье Обь-Иртыш МЦ чаще всего представляют собой циклоны небольшого масштаба (мезоциклоны). В отдельных случаях они могут развиваться до размеров синоптического масштаба с радиусом более 1000 км, становясь в этом случае основными циклонами. С МЦ часто связаны ошибки в прогнозах основных метеорологических полей, вследствие того, что локализация центра такого циклона трудно поддается прогнозированию. Над Западной Сибирью отмечается активная циклоническая деятельность, а к районам повышенного циклогенеза относятся междуречье Обь-Иртыш.

В год таких барических форм образуется около 25 [104], что составляет 20 % от числа всех проходящих циклонов [36, 38]. Тем не менее, их появление не всегда могут предсказать имеющиеся в оперативной практике модели погоды, что в значительной степени сказывается на качестве прогностического материала и степени успешности прогнозов погоды и, особенно, штормовых предупреждений.

Для получения наиболее эффективных результатов, прогноз прогнозы должен быть основан не только на анализе предполагаемого «будущего положения барического поля», но и на выявлении синоптической ситуации, при которой образуются те или иные МЦ. Актуально определение конкретных районов их образования в разные сезоны года, траектории смещения, интенсивность и другие характеристики. Для исследуемой территории анализировались лишь некоторые из этих характеристик более 10 лет назад.

При оценке территориальной локализации центров активного циклогенеза, как во внутригодовом [111], так и в межгодовом ходе, обнаружено (рис. 3.8) превышение числа циклонов, формирующихся на севере (52 %) и в центральных районах территории (23 %), а также для них определены следующие признаки активизации циклогенеза:

- 1) В холодный период за 1–2 дня до образования циклонов на высотных картах (рис. 3.5а) отмечается гребень антициклона над районами Западной и

Восточной Сибири, в отдельных случаях с незначительным ослаблением его западной периферии и обширная ложбина с центрами над Уралом и Европейской территорией России (ЕТР). При этом отмечаются южные потоки с районов Казахстана. У земли (рис. 3.6*а,б*) наблюдается ложбина над центральными районами Урала и на севере Сибири, гребень антициклона на западе Казахстана и юге Урала. Замечено образование циклонов при углублении южной части основной ложбины, ориентированной вдоль $66-72^{\circ}$ в.д. Если над районами о-ва Новая Земля и на севере Западной Сибири наблюдается антициклон, то основная ложбина вытягивается вдоль $56-60^{\circ}$ с.ш. от центрального Урала до среднего течения Енисея. При этом процессу местного циклогенеза предшествует активная адвекция тепла с повышением температурного фона на $10-15^{\circ}\text{C}$, в отдельных случаях на 20°C .

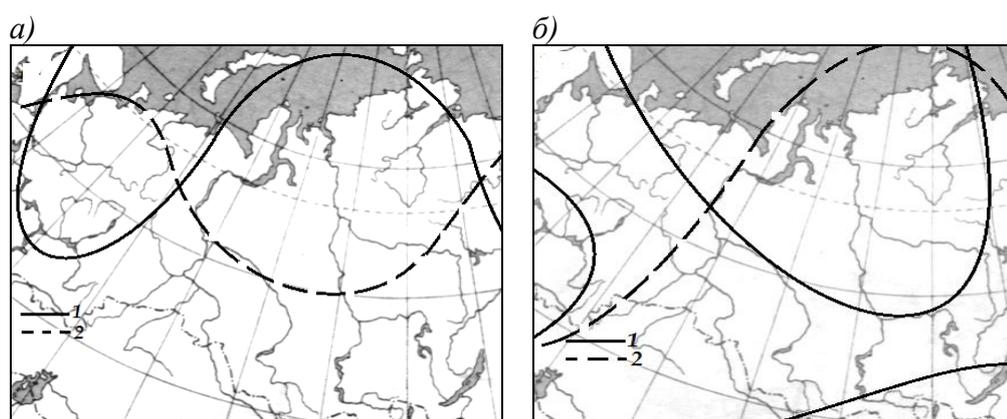


Рис. 3.5. Барическое поле на уровне АТ-500: *а)* – над северными и центральными районами; *б)* – на юге территории
1 – в холодный период; 2 – в теплый период

2) В теплый период за 1–2 дня до циклогенеза на высотных картах (рис. 3.5*а*) отмечается гребень антициклона над югом Урала и Западной Сибири и две ложбины: на западе ЕТР, на севере и в центре Западной и Восточной Сибири. Замечены северные потоки и активный заток холода вдоль восточной периферии высотного гребня с районов Карского и Баренцева морей.

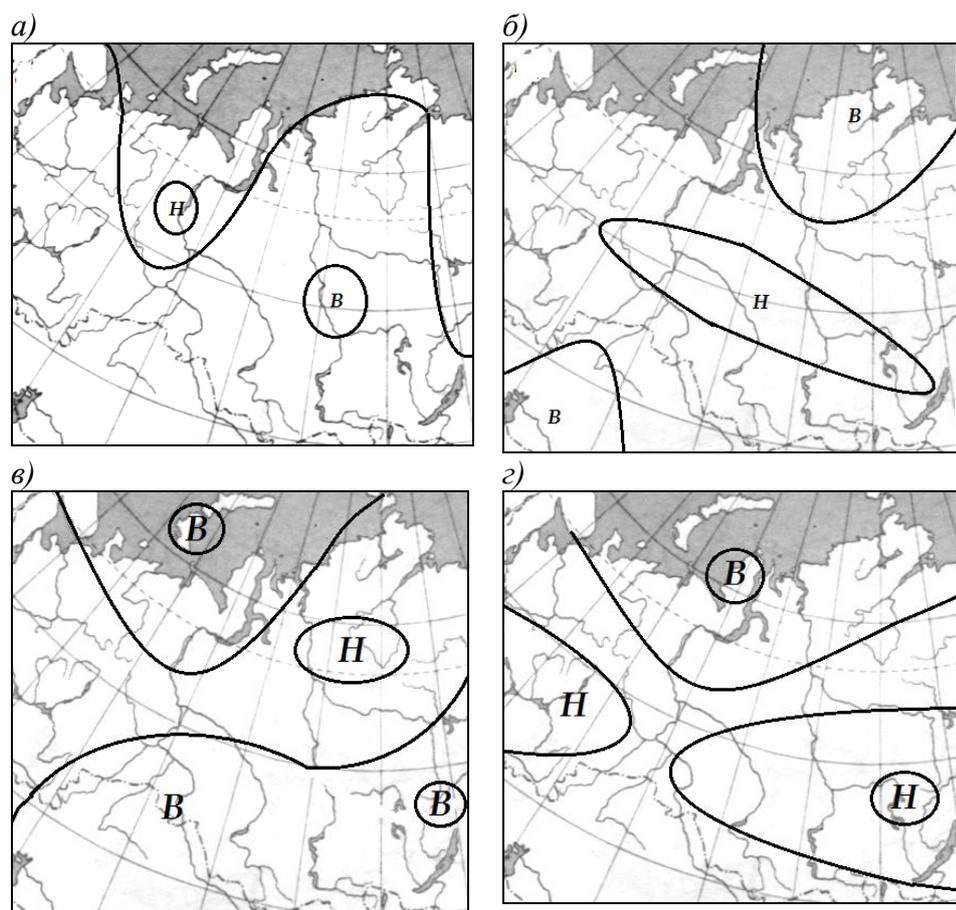


Рис. 3.6. Барическое поле у поверхности земли в северных и центральных районах:
холодный период – а), б); теплый период – в), г)

У земли возможны два варианта барического поля. В первом случае (рис. 3.6в): гребень антициклона над центром Урала и Сибири и область пониженного давления над севером ЕТР и Сибири. При этом МЦ формируются в южной части вытянутой ложбины основного циклона. Во втором случае отмечается обратная картина (рис. 3.6г), когда в центральных районах располагается барическая депрессия. Циклоны в данной ситуации формируются в передней или тыловой части вытянутой ложбины. При этом в обоих случаях отмечается адвекция холода, температурный фон понижается на 5–10°C, в отдельных случаях на 15°C. Смещаются такие циклоны преимущественно на восток, формируя погоду на большей части Томской области, а также в центральных и северных районах Красноярского края. Это наиболее интенсивные и развитые по вертикали барические депрессии (до высот 6 км и более), что закономерно, так как здесь

находятся крупные болотные системы, являющиеся дополнительным источником влаги.

Условия формирования циклонических вихрей в барическом поле над югом территории (21 %) значительно отличаются от тех, при которых МЦ локализуются в северных и центральных районах. Для данной группы циклонов также определены признаки активизации циклогенеза:

1) В холодный период за 1–2 дня до их образования на высотных картах (рис. 3.5б) отмечается обширный, широтно ориентированный гребень антициклона над большей частью территории Европы и антициклон с центром над северным побережьем Якутии. Север ЕТР и большая часть Сибири находятся под влиянием ложбины высотного циклона с центром над районами среднего течения Енисея. При этом в тропосфере господствуют юго-западные потоки с районов Аральского моря и оз. Балхаш. У земли (рис. 3.7а,б) над центром Сибири располагается гребень антициклона, а циклоническая деятельность наблюдается над северными и северо-западными районами Казахстана. Образование циклонов отмечается в передней части основной ложбины на фоне повышения температуры на 10–15°C.

2) В теплый период за 1–2 дня до образования МЦ на высотных картах (рис. 3.5б) отмечается обширная область повышенного давления над Восточной Сибирью. Над востоком ЕТР и Западной Сибирью располагается узкая, меридионально ориентированная ложбина циклона с центром над северным Уралом. Отмечаются южные, юго-западные потоки и вынос тепла с районов Каспийского и Аральского морей. У земли (рис. 3.7в,г) над Западной Сибирью и севером Казахстана меридионально располагается область низкого давления, а Урал и Восточная Сибирь находятся под влиянием гребня. При этом МЦ формируются в тыловой части вытянутой ложбины основного циклона, где происходит заток холодного воздуха с севера Сибири с понижением температурного фона на 5–10°C.

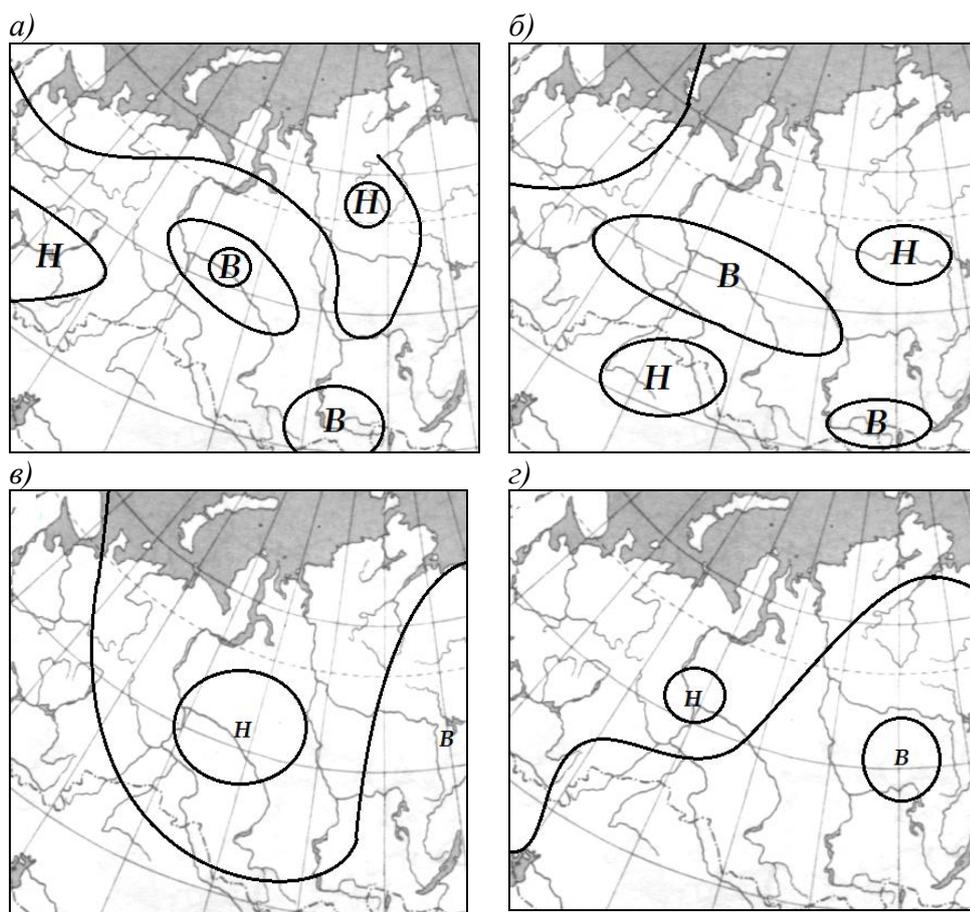


Рис. 3.7. Барическое поле у поверхности земли в южных районах: холодный период – а), б); теплый период – в), г)

Циклоны, образовавшиеся в южных районах территории, встречаются в 21 % случаев, они наименее интенсивны и развиты по вертикали и смещаются, преимущественно, на восток. Тем не менее, они могут увеличивать количество осадков, приводящих к наводнениям на территории Алтая [66], а также к другим опасным погодным явлениям.

В ходе анализа характеристик циклогенеза над территорией междуречья Обь-Иртыш выявлено, что циклоны, «живущие» в течение одних суток (74 %) формируются на севере территории (рис. 3.9). Это одни из самых глубоких и развитых по вертикали барических образований. Данный результат оказался неожиданным, так как предполагалось, что за одни сутки циклон не может получить значительного развития. Наибольшей интенсивности они достигают в переходные сезоны года при наличии значительных температурных контрастов и

скоростей основных воздушных потоков. Это наиболее трудно поддающийся прогнозированию вид циклонов, так как сложно предсказать произойдет ли углубление и развитие волны в циклон в течение одних суток. В данном случае, при его образовании решающим является динамический фактор, вследствие близости высотной фронтальной зоны (ВФЗ). Формирование таких циклонов в более южных районах рассматриваемой территории (50–60°с.ш., 60–90°в.д.) отмечается значительно реже, причем из ранних работ (И.П. Прокопьева, Т.С. Ситникова) следовало, что наибольшее их число образовывалось именно в южных районах Западной Сибири.

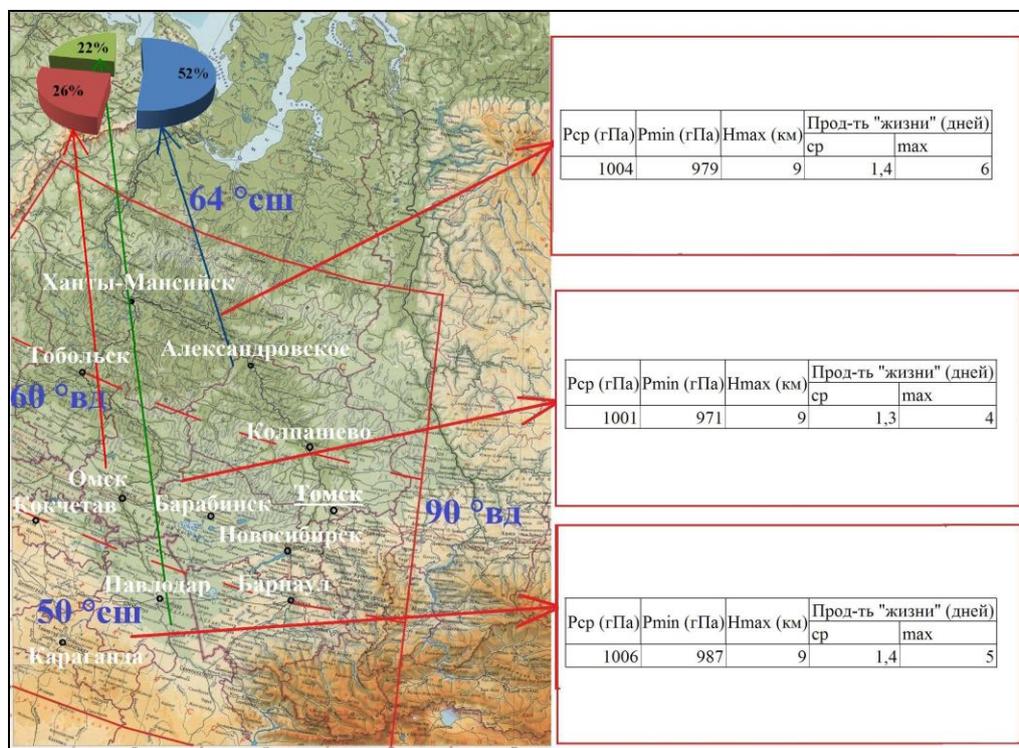


Рис. 3.8 – Характеристики циклонов в зависимости от района образования

Наиболее интенсивные и «живущие» 2–3 дня циклоны формируются в теплую часть года над центральными районами (54–60°с.ш., 60–90°в.д.), куда, в том числе, входит Большое Васюганское болото (БВБ). Определяющим фактором является температурно-влажностный фон. Циклоны с периодом «жизни» 4–6 дней

довольно глубокие барические образования, но встречаются они крайне редко (3%) и образуются, в основном, на севере и в центре.

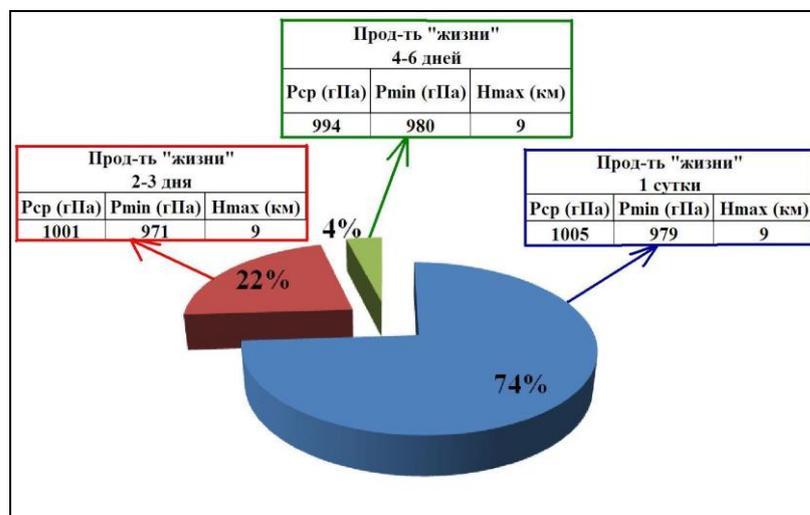


Рис. 3.9 – Характеристики циклонов в зависимости от продолжительности «жизни»

Если принимать во внимание только синоптическую ситуацию, то получено (рис. 3.10), что чаще всего циклоны имеют волновую природу, в 52 % случаев они представляют из себя одиночные вихри, а в 22 % смещающиеся сериями. Это наиболее глубокие и одни из самых развитых по вертикали циклонов.

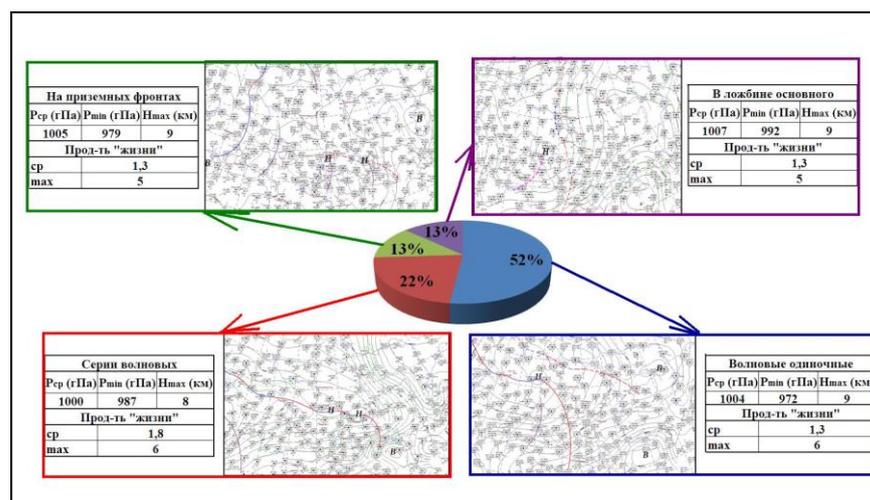


Рис. 3.10. Характеристики циклонов, классифицированных по синоптическому происхождению

Далее были сформулированы **признаки характерные для каждой из выделенных групп, на которые может обратить внимание синоптик:**

1) Влияние волновых МЦ можно ожидать в местах их непосредственного возникновения (74 %). Одиночных циклонов – на севере территории; серий – в центральных и северных районах Новосибирской, юге Томской областей, центральных и северных районах Красноярского края. В 21 % данные циклоны образуются на юге территории и оказывают влияние на районы Алтая и юга Красноярского края.

2) В относительно повышенном поле атмосферного давления формируются МЦ на приземных (вторичных) фронтах (13 %). Образуются они на севере территории и оказывают влияние на север Томской области и Красноярского края.

3) В 13 % случаев над северными районами территории образуются не глубокие в ложбине основной барической депрессии и малоподвижные быстро заполняющиеся МЦ. В половине случаев они смещаются на север, оказывая влияние на районы Обской Губы и полуострова Ямал, либо остаются малоподвижными.

Особый интерес вызывает возможность идентификации МЦ **в поле облачности**. По данным спутникового мониторинга они были поделены на два основных вида (рис. 3.4): циклоны, образующиеся в разреженном барическом поле (так называемые внутримассовые циклоны), и циклоны, находящиеся внутри фронтальной системы (фронтальные циклоны). **Замечено, что:**

1) Замечено, что МЦ (рис. 3.4а), образовавшимся на волнах размытых сильно окклюдированных фронтальных разделов (80%), на спутниковых снимках соответствуют внутримассовые циклоны (рис. 3.4б), идентифицируемые в виде отдельных облачных вихрей. Они имеют меньшую интенсивность, «живут» менее 2 дней и проходят меньшие расстояния. Формируются во все сезоны года, чаще локализуясь на севере и в центре территории (86 %).

2) МЦ, сформировавшимся на волнах развитых фронтальных разделов (рис. 3.4в), чаще всего в составе основных холодных фронтов, в поле облачности

соответствуют фронтальные вихри (рис. 3.4 ϵ). Они проходят значительные расстояния, могут распространять свое влияние вплоть до центральных и северных районов Красноярского края. Это глубокие барические образования, «живущие» более 2 суток. Локализуются в 87 % на севере и в центре территории и во все сезоны года. В 13 % случаев образуются на юге в холодный период и переходные сезоны.

Для понимания общей картины процессов образования циклонов, протекающих на исследуемой территории необходим анализ сезонной динамики изменения активности местного циклогенеза, а также его межгодовой изменчивости за продолжительный период времени.

3.3 Многолетняя повторяемость и сезонные особенности образования циклонов в междуречье Обь-Иртыш

За год в центре и на юге Западной Сибири образуется, в среднем, 25 МЦ, из них 8 в холодный, 7 в теплый периоды и 10 в переходные сезоны, а многолетняя повторяемость и продолжительность их «жизни» имеет квазициклический характер (рис. 3.11 a). При этом в последнее десятилетие общее число и продолжительность влияния циклонов оказались в 2–3 раза больше, чем за предыдущий период (1976–2007 гг.), так же отмечено их общее углубление и понижение минимального давления в центрах (рис. 3.11 b). Оно уменьшалось практически параллельно с ростом средней годовой температуры воздуха (рис. 3.11 $в$) и обнаруживает с ним значимую корреляционную зависимость с вероятностью не менее 95%. Можно предположить, что давление над исследуемой территорией постепенно уменьшалось вследствие общепланетарного проявления глобального потепления. Однако на этом фоне отмечалось сохранение и даже резкое увеличение бароклинности атмосферы. Возможно, это случилось в тот момент времени, когда прогрев подстилающей поверхности достиг определенного предела.

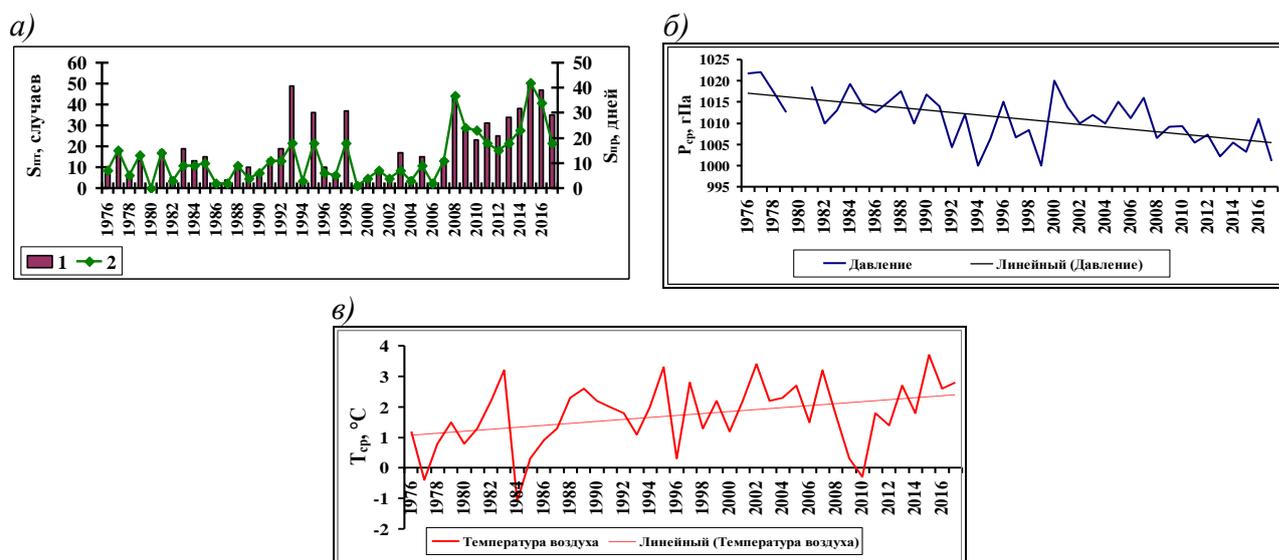


Рис. 3.11. а) Суммарная: 1 – продолжительность влияния ($S_{пр}$), 2 – повторяемость образования местных циклонов (S_{nm}); б) среднее значение давления (P_c); в) среднегодовая температура воздуха (T_{cp}), г. Новосибирск

Во внутригодовом распределении (рис. 3.12) большее число МЦ и наибольшая продолжительность «жизни» приходится в основном на летний сезон, а максимум процессов генерации и регенерации циклонов отмечается в августе (в среднем 5 случаев с продолжительностью «жизни» более 5 дней), когда подстилающая поверхность прогревается особенно сильно [104]. Возможно, это связано с увеличением бароклинности приземного слоя, как за счет температуры воздуха, так и увеличения влагосодержания во всей толще тропосферы вследствие дополнительного прогрева. В этот же период наблюдается наименьшее давление в центрах.

Зимой часто происходят блокирующие процессы [1, 6, 16, 35, 43, 44, 50, 60, 84] и МЦ, как правило, образуются в относительно повышенном поле давления. Тем не менее, замечено некоторое увеличение числа МЦ во вторую половину зимы (январь–февраль), что, возможно, связано с активной циклонической деятельностью на севере Сибири. По-видимому, сказывается влияние Исландской депрессии, которая является одним из основных центров действия атмосферы и генератором циклонов, приходящих на исследуемую территорию с севера. За последние 7 лет обнаружено увеличение числа циклонов, сформировавшихся на

юге территории в холодную часть года, в центральных районах – в теплую часть года.

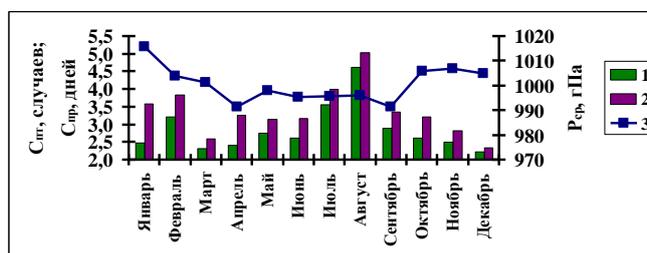


Рис. 3.12 – Средние: 1 – повторяемость (C_{nm}); 2 – продолжительность «жизни» (C_{np}); 3 – давление (P_c)

Таким образом, отмечается общее увеличение активности местного циклогенеза, наиболее заметное в последнее десятилетие, а также выравнивание числа образовавшихся молодых циклонов между сезонами года (33 %, 29 % и 38 % в холодный, теплый и переходный периоды соответственно). Из ранних работ (Л.И. Бордовская) следовало, что большая их часть (около 60 %) образовывалась в теплую часть года, на остальные сезоны приходилось только лишь 40 %.

Кроме синоптического подхода, в анализе механизмов формирования и развития МЦ, также важна оценка энергетических запасов в атмосфере над различными районами территории не только непосредственно в течение жизни циклона, но и за несколько дней до его зарождения и после полного заполнения. Это поможет определить некоторые пороговые значения определенных видов энергии, при которых над анализируемым районом на фоне той или иной синоптической ситуации может сформироваться циклон, что послужит неким маркером, способным помочь в прогнозе погоды (как в численном, так и в оперативном).

4. ЭНЕРГЕТИКА АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЦИКЛОГЕНЕЗЕ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМИ И ЮЖНЫМИ РАЙОНАМИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

4.1 Основные виды энергии

Из анализа научных исследований по циклонической активности видно, что для оценки степени неустойчивости атмосферы и возможности формирования циклонов как большого (ЦУШ), так и малого (МЦ) масштаба над различными районами Земного шара перспективным является учет энергетических запасов атмосферы в дни циклогенеза и предшествующий период. Наиболее важными для атмосферных процессов синоптического масштаба видами энергии являются [13, 61, 73, 120; 135; 144]:

- 1) кинетическая энергия горизонтальных движений $K = (U^2 + V^2)/2$;
- 2) потенциальная энергия $\pi = gz$;
- 3) внутренняя энергия $I = C_v T$;
- 4) энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды E_s .

Перечисленные климатические показатели вычисляются для единичного столба атмосферы на стандартных высотах или для главных изобарических поверхностей. Рассмотрим виды энергии.

Кинетическая энергия – это энергия движения. Измеряется работой, которую может совершить тело при его торможении до полной остановки. Кинетическая энергия массы воздуха определяется основным или осредненным движением этой массы и турбулентными флуктуациями скорости движения в этой массе. Уравнение, описывающее баланс кинетической энергии в квазистатическом приближении (для единицы массы):

$$K = \frac{1}{2g} \int_p^{p_0} V^2 dp, \quad (4.1)$$

Потенциальная энергия. В метеорологических науках в условиях земной атмосферы под потенциальной энергией понимают энергию, определяемую

положением единицы массы воздуха в поле силы тяжести Земли на какой-то высоте z , отсчитываемой от поверхности уровня океана $z_0=0$ для единичной массы воздуха:

$$\pi = \frac{R}{g} \int_P^{P_0} T dp - zp, \quad (4.2)$$

Внутренняя энергия. Известно, что внутренняя энергия идеального газа (в котором энергия взаимодействия между молекулами мала по сравнению с энергией теплового движения) определяется лишь кинетической энергией движения молекул и является функцией температуры, а атмосфера по своим свойствам близка к идеальному газу:

$$I = \frac{C_v}{g} \int_P^{P_0} T dp, \quad (4.3)$$

Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды. Данный вид энергии представляет собой суммарный эффект при процессах конденсации водяного пара и испарения облачных частиц и частиц осадков в рассматриваемом объеме воздуха:

$$Ec = \frac{L}{g} \int_P^{P_0} W dp, \quad (4.4),$$

В уравнениях (4.1)–(4.4) V – вектор скорости для элемента массы dm (м/с), z – высота (м), $R = 287$ Дж/(кг К) – универсальная газовая постоянная сухого воздуха, $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения, C_v – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме (Дж/кг К), T и P – температура (К) и давление воздуха (гПа), W – массовая доля водяного пара (г/кг), $L=2,49 \times 10^6$ Дж/кг – скрытая теплота парообразования.

Все элементы уравнений (4.1)–(4.4) рассчитывались для района аэрологической станции, располагающейся в области циклона, для слоев, находящихся между основными изобарическими поверхностями в толще атмосферы от поверхности Земли и до уровня 200 гПа и относятся к единице площади. Далее для данных уравнений производилась линейная интерполяция [8,

24] метеорологических полей в центр местного циклона по нескольким точкам (по формуле 2.4).

4.2 Анализ общих запасов энергии, накапливаемых местными циклонами в период их «жизни». Методические аспекты обработки информации

Изучением особенностей энергетики атмосферных процессов при формировании барических депрессий большого масштаба (диаметр порядка 2000 км), или так называемых циклонов умеренных широт (ЦУШ) над территорией Европы и запада России занимался Н.А. Калинин [62, 63]. Он рассматривал синоптическую обстановку, при которой формируются ЦУШ, их интенсивность (минимальное давление в центре), траектории и скорость смещения, а также анализировал временную и пространственную изменчивость запасов различных видов энергии в слое от поверхности земли до уровня 200 гПа [63].

Подобные исследования для циклонов меньшего масштаба (диаметром порядка 300–1000 км) до недавнего времени не проводились. Лишь в последнее время появились работы [105, 106, 164] по оценке энергетических запасов атмосферы при циклогенезе над территорией Западной Сибири.

В рамках настоящей диссертационной работы характеристики изменчивости энергетических запасов рассчитывались на основе сетевого температурно-ветрового зондирования на аэрологических станциях, находящихся на территории России и Казахстана в сроки 00 и 12 ВСВ (всемирное скоординированное время). Производился расчет характеристик отдельно по высотам и интервалам времени (за каждый день «жизни» циклона, а также за два дня до его образования и в день после полного заполнения) для каждой станции, попадающей в область циклона. Местоположение молодого циклона определялось по данным приземных синоптических карт за основные метеорологические сроки (00, 06, 12 и 18 часов ВСВ), кольцевых карт погоды (за сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 час ВСВ), а

также карт барической топографии. Полный перечень станций приведен в табл. Д.1. Методика идентификации МЦ описана в третьей главе.

Было выявлено (табл. 4.1), что в течение «жизни» МЦ наибольшие изменения претерпевают кинетическая энергия и энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, при этом запасы внутренней и потенциальной энергии практически не меняют своих значений, поэтому их можно исключить из дальнейшего анализа.

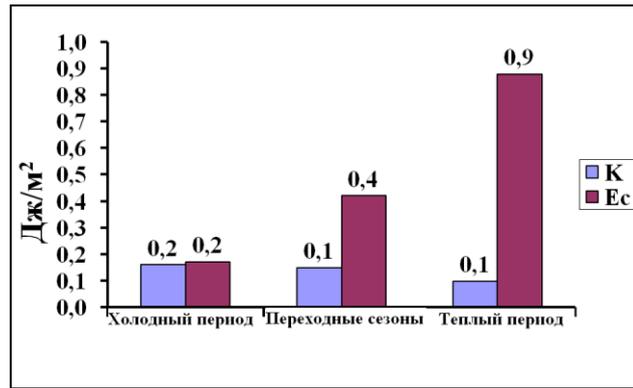
Таблица 4.1

Запасы основных видов энергии циклонов

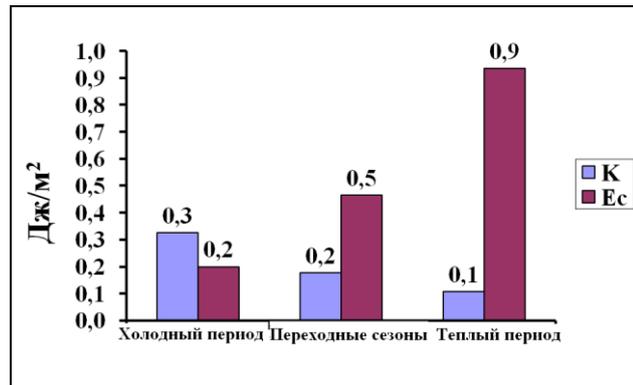
Период образования циклона	Виды энергии							
	Кинетическая, 10^6 Дж/м ²		Потенциальная, 10^8 Дж/м ²		Внутренняя, 10^9 Дж/м ²		Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, 10^7 Дж/м ²	
	Ср. (σ)	Макс	Ср. (σ)	Макс.	Ср. (σ)	Макс.	Ср. (σ)	Макс.
Циклоны, образующиеся в междуречье Обь-Иртыш (МЦ)								
Теплый	0,7 (0,2)	1,1	0,104 (0,02)	0,176	0,4 (0)	0,6	0,7 (0,5)	2,6
Холодный	1,5 (0,8)	2,9	0,103 (0,06)	0,136	0,3 (0,1)	0,4	0,3 (0,2)	0,6
Циклоны, смещающиеся с других районов								
Теплый	0,7 (0,4)	2,1	0,104 (0,03)	0,180	0,4 (0,1)	0,6	2,1 (0,8)	3,2
Холодный	1,8 (0,5)	3,2	0,103 (0,03)	0,140	0,3 (0,1)	0,5	0,4 (0,4)	1,1

Для понимания специфики общего энергетического поля, на фоне которого формируются МЦ, были рассчитаны средние месячные значения энергий (кинетической и фазовых переходов воды) по данным аэроклиматических справочников свободной атмосферы [114–116] над центральными и южными районами Западной Сибири (рис. 4.1). Также приведены значения запасов энергии для циклонов, приходящих с других направлений.

а)



б)



в)

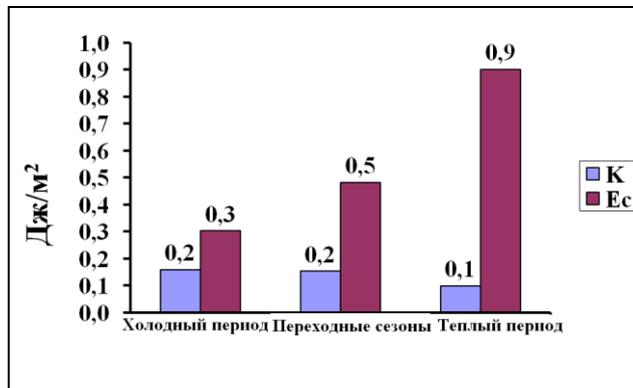


Рис. 4.1. Среднемесячные значения кинетической энергии (K , 10^6 Дж/м²) и энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды (E_c , 10^7 Дж/м²) в атмосфере над различными районами исследуемой территории Западной Сибири:

а) север, б) центр, в) юг

В ходе анализа средних месячных значений запасов энергии, которыми обладает атмосфера, выявлено, что формирование МЦ на всей территории происходит при одинаковых условиях, а различия (в структуре

метеорологических полей и энергетике) определяются лишь особенностями подстилающей поверхности, над которой происходит циклогенез. Также для случаев с местными циклонами различных групп (Е.1; Ж.1) получено:

1) МЦ лучше всего проявляют себя в значениях кинетической энергии и энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды, так как только эти виды энергии имеют наибольшую изменчивость (табл. 4.1).

2) Изменения потенциальной и внутренней энергии в течение года не значительны.

3) Максимальные запасы кинетической энергии ($2,6 \times 10^6$ Дж/м²) отмечаются у волновых МЦ (рис. 4.2), формирующихся в зимний период, что в 2–4 раза превышает показатели остальных циклонов, и объясняется влиянием ВФЗ и струйных течений, с которыми связаны значительные контрасты температуры и давления. Тем не менее, это в 1,5 раза меньше аналогичных значений циклонов, смещающихся с других районов (табл. 4.1).

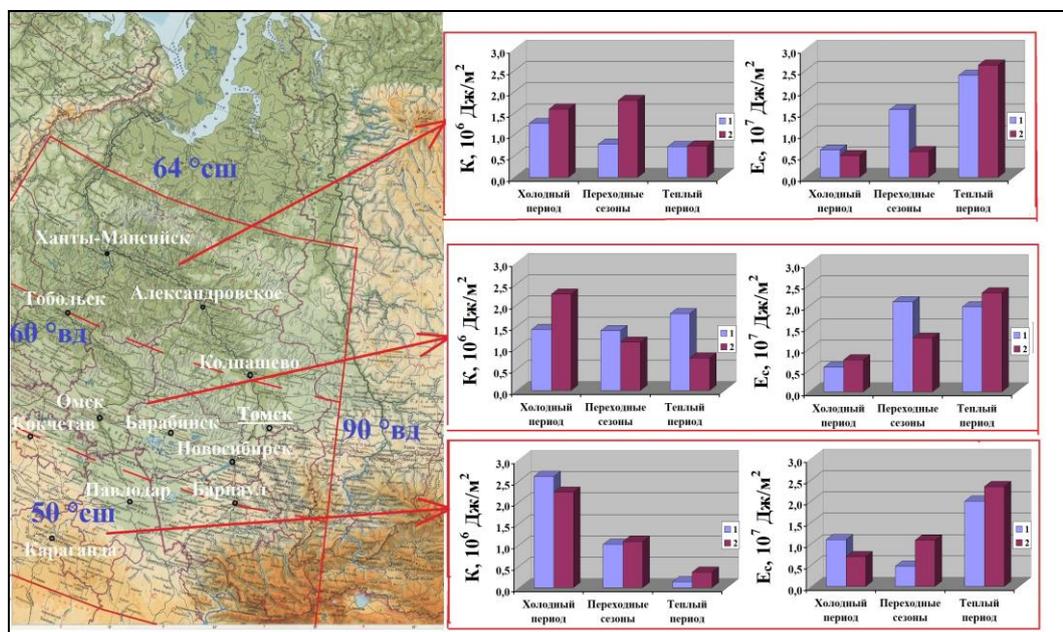


Рис. 4.2. Максимальные запасы энергии местных циклонов: 1 – внутримассовые, 2 – фронтальные

4) Наибольшие запасы скрытой энергии фазовых переходов воды ($2,1 - 2,6 \times 10^7$ Дж/м²) в тропосфере отмечаются в теплый период у циклонов

образующихся над болотистыми районами севера и центра территории, причем непосредственно над Васюганским болотом образуется до 40 % всех молодых циклонов [105, 164]. Это объясняется дополнительными эманациями влаги, участвующей в процессе циклогенеза.

Для понимания общей картины циклогенеза над центральными и южными районами Западной Сибири представляется актуальным рассмотреть его взаимосвязь с макроциркуляционными процессами и определить устойчивые во времени и пространстве очаги повышенного циклогенеза, а также выявить их роль в формировании климата региона.

5. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТНЫХ ЦИКЛОНОВ В МЕЖДУРЕЧЬЕ ОБЬ-ИРТЫШ В 1976–2017 ГГ.

5.1 Связь местных циклонов с общей циркуляцией атмосферы и положением Высотной фронтальной зоны

При прогнозировании различных параметров состояния атмосферы (температура, осадки, давление, скорость и направление ветра и др.) одним из основополагающих факторов является прогноз барического поля (основных барических образований). Наибольший интерес для практикующего синоптика представляют МЦ, которые быстро образуются над исследуемой территорией и существуют не более одних суток. Как оказалось, такие циклоны имеют высокую повторяемость, они менее интенсивные (имеют более высокое, по сравнению с остальными, давление в центре), имеют волновой характер, то есть могут образоваться на любой волне (сложно оценить предпосылки этого), и достаточно развиты по вертикали. У циклонов, «живущих» более продолжительный период, легче проследить траекторию их движения и учесть ее в прогнозе, только с меньшей заблаговременностью. Для понимания общей картины циклогенеза над Западной Сибирью представляется актуальным рассмотреть его взаимосвязь с макроциркуляционными процессами: с преобладающими формами атмосферной циркуляции и положением ВФЗ.

В ходе исследований была изучена возможность влияния форм атмосферной циркуляции и ВФЗ на местный циклогенез. В дни с МЦ рассматривалась синоптическая обстановка (по данным кольцевых карт погоды и карт барической топографии), данные о преобладающих формах циркуляции атмосферы, положении ВФЗ, значениях индекса циркуляции Блиновой, влияние центров действия атмосферы (Понта-Дельгада, Стиккисхоульмюр, Кола (Мурманск), Иркутск, Ташкент), а также ледовитости Баренцева моря за 1976–2017 гг., предоставляемых специалистами ЗС УГМС (группа долгосрочных прогнозов погоды). Проведен корреляционный (по классификациям Фехнера, Пирсена и др.)

и регрессионный анализы между значениями повторяемости крупномасштабных процессов и циклогенезом в центре и на юге Западной Сибири.

В рамках настоящей диссертационной работы была использована классификация атмосферных процессов Г.Я Вангенгейма-А.А. Гирса [26], согласно которой все они были поделены на три основных типа (рис. 5.1): западный (*W*), восточный (*E*) и меридиональный (*C*). При *W* форме циркуляции в атмосфере отмечаются зональные движения воздуха. Преобразование этой формы в *E* или *C* связано с появлением в атмосфере стационарных волн с большой амплитудой.

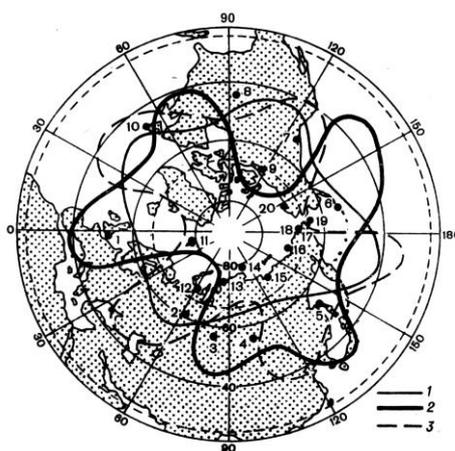


Рис. 5.1. Положение основных высотных (500 гПа) гребней и ложбин в кульминационной стадии процессов форм атмосферной циркуляции: 1 – *W*, 2 – *E*, 3 – *C*

В ходе анализа преобладающих в атмосфере форм циркуляции было выявлено (рис. 3.1), что до 1990 года погоду рассматриваемой территории определяла, в основном, форма *E* [103], максимум ее влияния пришелся на 1981 год (около 265 дней при норме в 145 дней) при этом в большинстве дней над ЕТР) и Уралом располагался мощный высотный гребень, препятствуя поступлению теплых и влажных воздушных масс с районов Атлантики. В данной ситуации Западная Сибирь (ЗС) оказывалась на восточной периферии высотного гребня, где отмечался заток холодного арктического воздуха с районов полуострова Таймыр. При этом у земли чаще всего располагался обширный стационарный антициклон. В этот период зональный перенос был значительно ослаблен или

отсутствовал совсем (максимальная отрицательная аномалия отмечалась в 1976 году, когда западная циркуляция отмечалась только 37 дней при среднегодовой норме в 127 дней), поэтому местный циклогенез был значительно затруднен. С начала 90-х гг. прошлого столетия несколько повышенная повторяемость формы циркуляции *E*, наблюдалась в 2001 и в 2014 гг., причем в эти же годы замечено и (рис. 5.2) увеличение средних годовых значений скорости ветра на станциях Томской [53] и Новосибирской областей, расположенных вне населенных пунктов (коэффициент корреляции между средними годовыми значениями скорости ветра и повторяемостью формы циркуляции *E* статистически значим с вероятностью не менее 95%). Это может быть связано с тем, что меридионально ориентированные затоки холода усиливают градиенты давления и способствуют увеличению скорости ветра.

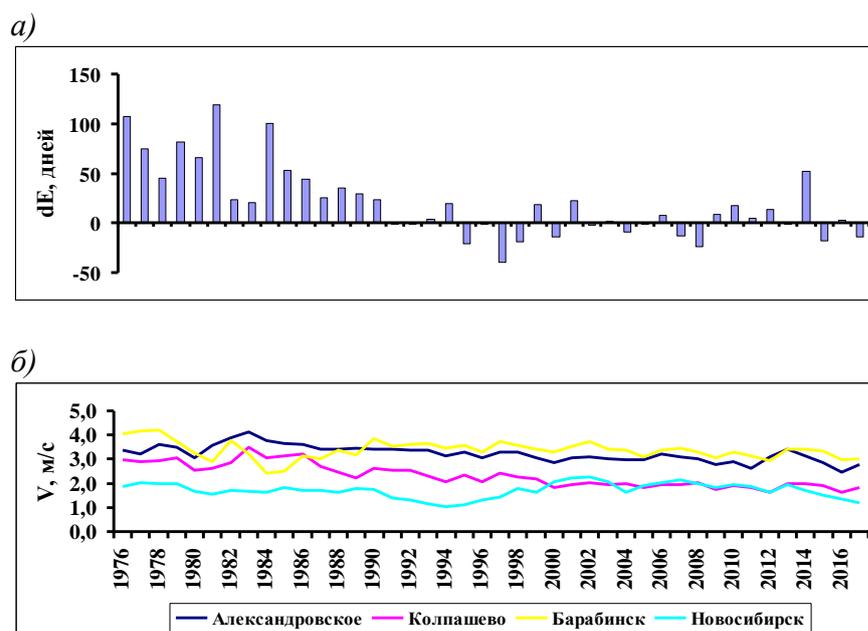


Рис. 5.2. Климатические характеристики для центральных и южных районов Западной Сибири: а – Сумма дней с отклонением от нормы восточной формы циркуляции (dE) ; б – средняя скорость ветра по флюгеру (V)

Далее характер циркуляции стал существенно меняться. Так в 1991–1998 гг. с некоторым усилением меридиональной составляющей (*C*) территория ЗС чаще (118 дней, при норме в 93 дня) оказывалась в передней части высотной ложбины,

где под юго-западными потоками выносился теплый и влажный воздух с районов Черного и Каспийского морей, при этом с северо-запада ЕТР отмечался заток холодного воздуха. У земли при этом формировалась обширная область пониженного давления.

Данные условия и наличие значительных дополнительных температурно-влажностных контрастов способствовали общему усилению циклонической активности, и как следствие, активизации местного циклогенеза в междуречье Обь-Иртыш. Так в этот период наблюдалось повышение суммарной повторяемости в два, а продолжительности жизни МЦ в полтора раза по сравнению с предыдущим 14-ти летним периодом, максимум повторяемости (50 случаев) и суммарной продолжительности жизни (20 дней) пришелся на 1993 год (рис. 3.11а).

Далее произошло восстановление зонального переноса (W), и даже некоторое его усиление, а пик активности пришелся на 2008 год, когда воздушные массы поступали с запада, с районов Атлантики в течение 177 дней (при норме в 127 дней).

В последнее десятилетие характер циркуляции стал близким к нормальному распределению. Тем не менее, происходило незначительное поочередное усиление и ослабление W и E форм циркуляции. Причем стал отмечаться большой перепад аномалий во внутригодовом распределении.

В 2008–2017 гг., западный перенос был в пределах или выше нормы только в теплую часть года (с апреля по сентябрь). В этот период отмечены наибольшие показатели повторяемости и продолжительности жизни циклонов. Резкая смена одной формы циркуляции другой приводит к появлению значительных температурно-влажностных контрастов и усилению циклонической активности.

Замечено, что в течение года МЦ чаще всего формируются вдоль ВФЗ, либо имеют более северное положение. Только в летние месяцы они могут локализоваться южнее.

Во внутригодовом ходе (рис. 5.3) видно, что в 1976–2007 гг., практически в течение всего года W и C формы циркуляции наблюдались чаще обычного,

максимум пришелся на июль (больше нормы на 3 и 4 дня соответственно). При этом *E* форма была ослаблена и только лишь в зимние месяцы отмечалось ее восстановление и некоторое увеличение.

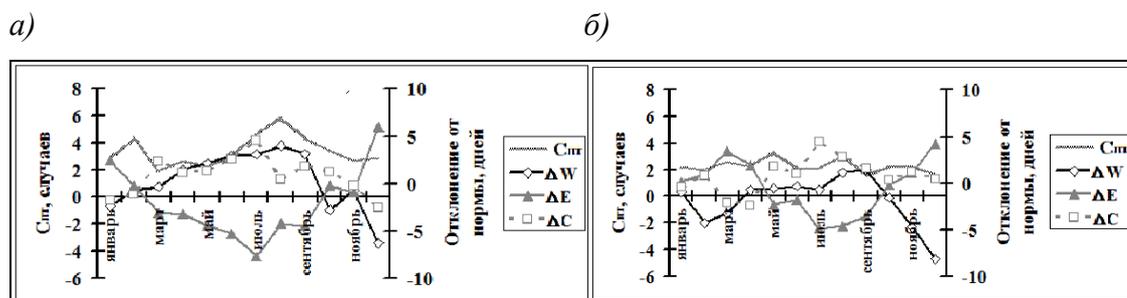


Рис. 5.3. Сезонное соотношение отклонений различных форм атмосферной циркуляции и средней повторяемости (C_m) образования МЦ: а) 1976–2007 гг., б) 2008–2017 гг.

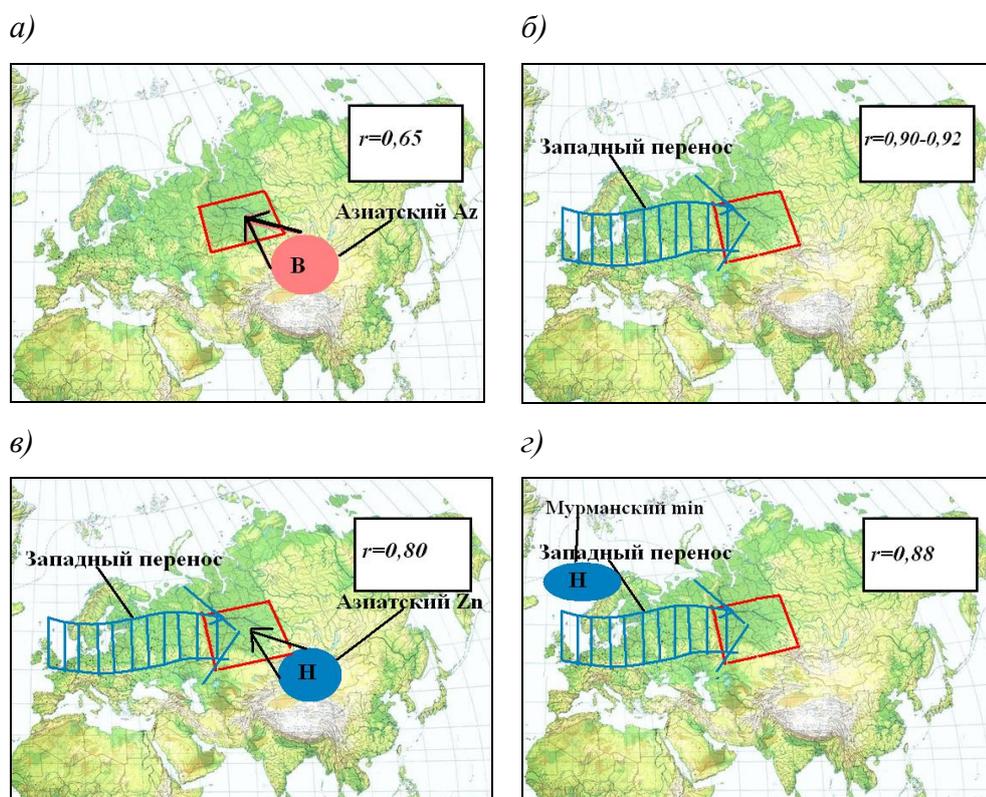
В 2008–2017 гг., западный перенос был в пределах или выше нормы только в теплую часть года (с апреля по сентябрь), причем в этот период отмечены наибольшие показатели повторяемости и продолжительности жизни МЦ [103], а максимум наблюдался в 2008, 2015–2016 гг. и составлял около 50 случаев при продолжительности влияния на территорию около 40 дней.

Однако корреляционный анализ (по классификации Фехнера) не выявил высокой связи между повторяемостью крупномасштабных процессов и циклогенезом в центре и на юге Западной Сибири. Тем не менее, анализ индекса зональной циркуляции (индекс Блиновой), а также влияния центров действия атмосферы показали, что в отдельные месяцы они могут оказывать существенное влияние на процессы генерации и регенерации циклонов (табл. 3.1).

Было обнаружено (рис. 5.4):

1) В феврале на процессы циклогенеза оказывает статистически значимое влияние (коэффициент множественной регрессии $r=0,65$) южный отрог Азиатского антициклона, располагающийся над районами Ташкента. Возможно, это связано с тем, что при усилении данного отрога (увеличения его площади) на

всей территории ЗС устанавливается повышенный фон атмосферного давления, что затрудняет процессы генерации циклонов.



r – коэффициент множественной регрессии

Рис. 5.4. Влияние различных форм циркуляции атмосферы на циклогенез над Западной Сибирью:

а) холодный период (февраль, март); б) теплый период (июнь, август); переходные сезоны
в) апрель, г) май

2) В марте сказывается влияние ($r=0,80$) северного отрога Азиатского антициклона (с центром над Иркутском) и отмечается усиление зональных процессов.

3) К апрелю отмечается разрушение южной части Азиатского антициклона и усиление циклонической активности, продолжающееся и в мае ($r=0,88$) вследствие восстановления западного переноса.

4) В летний период (июнь, август) процессы регенерации и генерации циклонов в центре и на юге ЗС практически полностью ($r \geq 0,90$) обуславливается

зональными процессами, вследствие непосредственного поступления воздушных масс с районов Атлантики и общим понижением фона атмосферного давления в исследуемом регионе.

Таким образом, процессы формирования и развития МЦ могут быть диагностированы по наличию в атмосфере значительных запасов кинетической энергии в холодный период, энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды – в теплый.

5.2 Многолетние устойчивые центры повышенного циклогенеза. Синоптические, орографические, энергетические особенности данных районов. Кластерный анализ

Вследствие того, что наряду с макроциркуляционными процессами значительное влияние на циклогенез в междуречье Обь-Иртыш оказывают местные факторы, для анализа особенностей (синоптических, гидрологических, орографических, энергетических, сезонных) различных районов территории был проведен кластерный анализ характеристик МЦ, а также выявлены многолетние устойчивые центры повышенного циклогенеза.

До процесса кластеризации для каждого из циклонов, был определен ряд признаков:

1. координаты центров циклонов в день их формирования (широта и долгота);
2. расстояния, на которое переместились циклоны в течение своей «жизни»;
3. минимальное давление в центрах циклонов;
4. продолжительность влияния;
5. значения запасов энергий K и E_c (кинетической и энергии фазовых переходов воды) для единичного столба атмосферы в слое 200–1000 гПа, интерполированных в центр барического образования.

Кластеризация проводилась с помощью двух методов – иерархического и k -средних (k -mean). Оценка разбиения проходила на основании функционалов

качества – суммарная внутриклассовая дисперсия и сумма внутриклассовых расстояний. В результате чего полученные классы объединили случаи с циклонами, имеющими близкие значения перечисленных выше переменных признакового поля. По результатам анализа выделились три достаточно плотно сгруппированных класса. Средние значения признаков кластеризации приведены в таблице 5.1, причем расстояние между классами превышает внутриклассовые более чем в два раза (от 7,3 до 13,6).

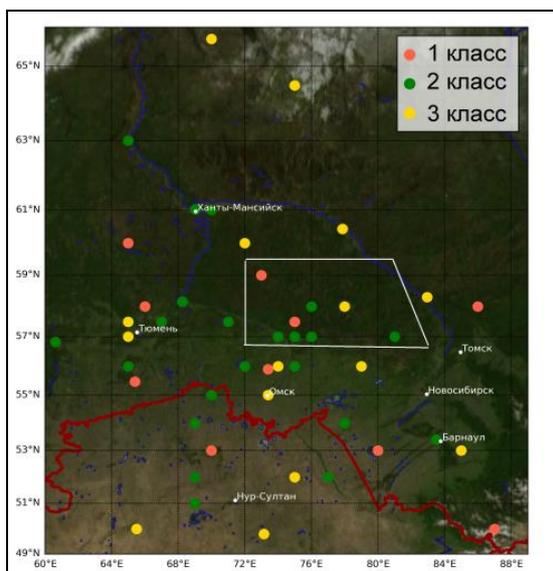
Таблица 5.1

Средние значения характеристик признакового поля кластеризации

Характеристика признакового поля	Классы		
	1	2	3
Расстояние внутри класса	3,4	4,0	3,7
Количество объектов	16	16	12
Минимальное атмосферное давление в центре, гПа	990	1011	1000
Продолжительность «жизни» циклонов, дни	3	2	2
Пройденная дистанция, км	1350	2155	612
Кинетическая энергия (K) в слое 200–1000 гПа, 10^6 Дж/м ²	0,6	1,0	1,0
Энергия фазовых переходов воды (E_c) в слое 500–1000 гПа, 10^7 Дж/м ²	1,9	0,7	0,6

При кластеризации было проведено обобщение ареалов формирования МЦ, в которые были включены не менее 95 % из числа объектов, принадлежащих рассмотренным выше классам, схема которого приведена на рис. 5.5.

В результате кластеризации в первом классе сгруппировались, преимущественно, внутримассовые МЦ, для которых характерны наибольшие средняя продолжительность «жизни» (до 3 дней) и степень вертикального развития (выше 9 км), а также наименьшее давление в центрах (990 гПа и ниже). Такие барические образования обладают наибольшими запасами E_c , и способны смещаться в течение жизни на значительные расстояния (среднее 1350 км, максимальное – 2270 км). Заметим, что большая часть их сформировалась над районом БВБ в теплую часть года.



Белой линией ограничена территория Большого Васюганского болота

Рис. 5.5. Ареалы образования местных циклонов, отнесенных к разным классам

Решающим фактором при формировании второго и третьего классов были различия в значениях давления в центре циклонов и пройденная дистанция. При этом запасы кинетической энергии и энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды у обоих классов имели наибольшие значения.

Во второй класс вошли МЦ, формирующиеся в зоне основных фронтальных систем. Это самые холодные, коротко «живущие» и быстро смещающиеся барические образования (среднее расстояние 2155 км, максимальное – 2930 км), формирующиеся в районе БВБ и его окрестностей в холодный период года на фоне повышенного атмосферного давления и значений кинетической энергии выше уровня среднего ($1,06 \times \text{Дж}/\text{м}^2$). По-видимому, решающим в их образовании фактором является динамический. Следовательно, в период жизнедеятельности этих циклонов по пути их перемещения можно ожидать повышенных значений скорости ветра.

В третий класс попали внутримассовые, медленно смещающиеся МЦ, расположенные в поле барических депрессий, большая часть которых (70 %) образовалась в холодную часть года. Это наиболее низкие барические образования (средняя высота развития составляет около 5500 км).

МЦ первого и второго класса, зачастую (более 80 % случаев), сопровождались такими опасными явлениями погоды [102, 107, 108] как грозы, сильный ветер, ливневые дожди и ливневый снег. С циклонами третьего класса фиксировался (47 % случаев), в основном, лишь ливневый снег.

Из анализа полученных результатов вытекает вывод, о том, что болота, в особенности Большое Васюганское болото, играют важную роль в формировании климата центра и юга Западной Сибири. Поэтому, для оценки вклада болотных систем в процессы глобального изменения климата, необходимо понимать физические механизмы их влияния.

5.3 Роль болот в формировании климата

Заболоченность Западно-Сибирской равнины (70,4 млн. га) относится к мировому природному феномену, и на Земле сложно найти территорию, где бы болота занимали такие огромные площади. Болото в начале своего развития является результатом совместного влияния различных факторов и формируется при наличии [59, 74]:

- 1) плоского рельефа местности с небольшими перепадами относительных высот;
- 2) разветвленной речной сети;
- 3) близкого к поверхности залегания грунтовых вод;
- 4) благоприятных климатических условий (оптимального температурного и влажностного режима), способствующих избыточному увлажнению местности.

Полностью сформированные болотные массивы, вследствие большой площади, занимаемой ими, а также сконцентрированных в них огромных объемах торфа, являются климатообразующим фактором не только в региональном, но и в глобальном масштабе. Известно [59, 74], что болота аккумулируют в год миллионы тонн углекислого газа и продуцируют миллионы тонн метана и кислорода. Кроме того, до последнего времени считалось, что парниковый эффект от метана в 25 раз сильнее, чем от углекислого газа. Однако теперь

Межправительственная группа экспертов по изменению климата ООН (IPCC) утверждает [83], что «парниковый потенциал» метана еще опаснее, чем оценивалось раньше. По данным наземных станций, и картам глобального масштаба, опубликованным NASA, в приземной атмосфере ЗС имеется очаг высоких эманаций метана (<https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=5270>).

В атмосфере ЗС содержание метана значительно из-за наличия болотных комплексов в междуречье Обь-Иртыш. Учитывая его высокую теплоемкость, можно ожидать и увеличения значений температуры почв и воздуха над этими комплексами. По всей видимости, это увеличение происходит не равномерно над всей территорией по причине разнообразия структуры болотного комплекса, а фрагментарно, при этом увеличивая бароклинность атмосферы над этим районом. И даже если этот процесс не играет решающей роли в имеющихся тенденциях потепления климата Сибири, его вклад в изменение климата на региональном уровне очевиден.

С целью более детальной оценки вклада энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды в общие запасы энергии, было рассмотрено несколько случаев (рис. 5.6) формирования МЦ. Анализировалось по два случая с циклонами, образовавшимися в теплый и холодный периоды года над Васюганьем (23 июля 2015 г. и 15 декабря 2016 г.), и в других районах территории (27 июля 2015 г. и 23 декабря 2016 г.). Причем, замечено, что наибольшие запасы энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды закономерно отмечаются в слое 1000–500 гПа, так как именно в этом слое наблюдается максимальная концентрация атмосферной влаги.

Рассмотрим отдельно циклоны, сформировавшиеся над БВБ.

Первый из рассматриваемых волновых МЦ образовался в системе полярного фронта в 15 ВСВ 22 июля 2015 г. при регенерации над районами болота старого циклона, смещавшегося с территории северного Казахстана и влившегося в ложбину основного циклона с центром над средним Уралом. Наибольшей интенсивности молодой циклон достиг к 12 ВСВ 23 июля, а минимальное давление в центре составило 1003 гПа. Далее произошло окклюдирование

основной системы фронтов, и МЦ, смещаясь на северо-восток, полностью заполнился над центральными районами Красноярского края к 12 ВСВ 24 июля.

Второй волновой циклон сформировался на арктическом фронте в 00 ВСВ 15 декабря 2016 г. в передней части ложбины основного циклона, выходившего с районов северного Казахстана. Минимальное давление в центре вихря составило 1010 гПа. К 03 ВСВ 16 декабря смещаясь на северо-восток, циклон углубился до 995 гПа и достиг стадии максимального развития над районами Киренска (58°с.ш., 108°в.д.). Продолжая свое движение далее на северо-восток, вихрь заполнился над территорией Якутии.

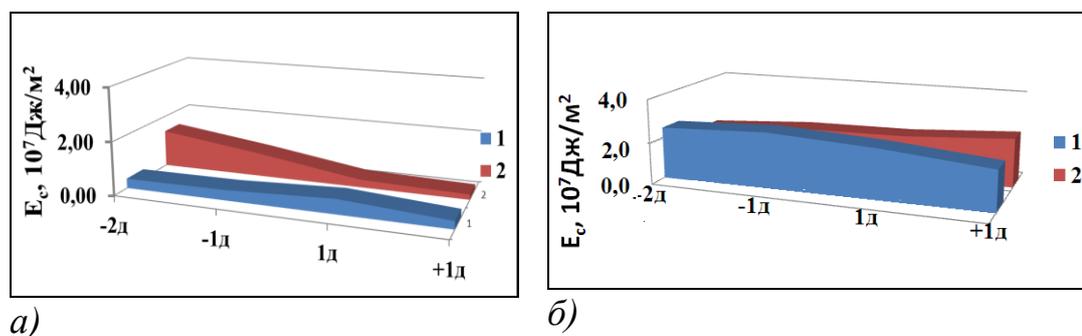
Далее рассмотрим циклоны, сформировавшиеся вне территории Васюганья.

Первый циклон, образовавшийся в 00 ВСВ 27 июля 2015 г., представлял собой двуцентровую депрессию, сформировавшуюся на полярном фронте, один центр которой располагался над районами юга Тюменской области, второй – на юго-востоке Омской области. Данный циклон находился в южной части ложбины основного циклона, смещающегося по побережью Карского моря. Минимальное давление в центре молодого циклона составило 994 гПа. При движении на юго-восток к 00 ВСВ 28 июля он достиг наибольшей интенсивности (горизонтальный размер с диаметром порядка 1000 км), углубившись на 4,5 гПа. Началось окклюдирование основной системы фронтов. К 00 ВСВ 29 июля циклон стал холодным высоким барическим образованием (с ним была связана система вторичных фронтов), располагаясь над районом Омска (55°с.ш., 73°в.д.), после чего продолжил свое движение на восток, полностью заполнившись к 12 ВСВ 29 июля над территорией Новосибирской области.

Второй из рассмотренных молодых циклонических образований сформировался на волне арктического фронта над северными районами Казахстана, в передней части ложбины основного циклона в 21 ВСВ 22 декабря. Минимальное давление в центре составило 1020 гПа. При смещении на северо-восток МЦ достиг максимального развития к 12 ВСВ 23 декабря (минимальное давление в центре составило 1014 гПа), после чего при дальнейшем движении

произошло его полное заполнение к 12 ВСВ 24 декабря над районом севера Байкала.

Анализируя график изменения энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды (E_c) в теплый период года (рис. 5.6а,б), можно заметить, что в циклоне, сформировавшемся над БВБ, наблюдается накопление E_c в период, предшествующий зарождению циклона, когда отмечается максимальное значение E_c ($3,6 \times 10^7$ Дж/м²). Уже за день до момента образования (-1д) непосредственно над территорией болота происходит углубление ложбины и оформление молодого циклона, сопровождающееся выделением дополнительной влаги. Далее при удалении от БВБ (как источника влаги) отмечается равномерный расход энергии на всем протяжении «жизни» МЦ.



1 – Территория Большого Васюганского болота; 2 – другие районы

Рис. 5.6. Значения энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды (E_c) при циклогенезе: а) холодный период; б) теплый период

В циклоне, образовавшемся вне территории БВБ, отмечается равномерное увеличение E_c в течение всего периода жизни МЦ, что возможно объясняется наличием влаги адвективного характера и влиянием других источников. Максимальное значение E_c достигается к концу «жизни» МЦ, когда он полностью заполняется и вливается в ложбину основного циклона (+1д) и составляет $3,4 \times 10^7$ Дж/м².

В холодный период (рис. 5.3.1в,г) в циклоне, сформировавшемся над БВБ, также как и в теплое полугодие наблюдается накопление E_c в период, предшествующий зарождению циклона, максимальное значение E_c ($0,8 \times 10^7$ Дж/м²) отмечается в его первый день «жизни» (1д). Это, возможно, объясняется

тем, что в первой половине декабря 2016 года [94] на юге ЗС отмечалась значительная положительная аномалия температуры воздуха (максимальные дневные температуры были в пределах от 0 до -5°C). Мягкая погода могла способствовать более позднему замерзанию БВБ и, как следствие, его влиянию на процесс циклогенеза посредством дополнительного выделения влаги открытыми (свободными ото льда) участками болота. Далее при удалении от БВБ отмечается быстрый равномерный расход энергии до момента полного заполнения МЦ (+1д).

В циклоне, образовавшемся вне территории БВБ, максимальное значение E_c отмечается в течение стадии волны на фронте (-1д) и составляет $1,7 \times 10^7$ Дж/м². Далее наблюдается равномерный расход E_c в течение всего периода существования МЦ, что возможно объясняется ее преобразованием в процессе его движения.

Сравнивая полученные результаты с данными для ЦУШ [63] можно заметить, что от месяца к месяцу запасы E_c в МЦ значительно уступают аналогичным показателям циклонов большого масштаба и претерпевают значительные изменения ($0,66$ и $0,23 \times 10^7$ Дж/м² соответственно в апреле и декабре). В ЦУШ [63] в течение года существенных изменений рассматриваемого вида энергии не отмечается ($2,36$ и $2,62 \times 10^7$ Дж/м² соответственно в апреле и декабре).

Таким образом, местный циклогенез может быть лишь на 50 % (февраль, март, апрель, май, июнь и август) описан изменениями общей циркуляции атмосферы. В остальных случаях главную роль играют именно местные факторы, решающими из которых могут быть процессы, происходящие над территориями болот вследствие увеличения бароклинности атмосферы, роста температуры воздуха и ожидаемого роста содержания водяного пара в атмосфере из-за эманаций метана. Непосредственно над районами Васюганья наблюдается активный циклогенез, как на линии фронтальных разделов, так и внутримассовый, физической причиной которого является энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды. Все это может говорить о существенном вкладе болот в процессы современного изменения климата.

На основании комплексного анализа полученных характеристик местных циклонов, для ситуаций с потенциальной возможностью их развития определены пороговые значения энергии, при которых инициируется циклогенез. Также для этих случаев сформулированы **признаки перспективные для использования в оперативных прогнозах** в различные сезоны года (рис. 5.7):

1. В холодный период можно ожидать формирование циклонов в малоградиентном поле повышенного давления (1013–1019 гПа). Решающим фактором являются средние запасы кинетической энергии: на севере и в центре $\geq 0,8 \times 10^6$ Дж/м², на юге $\geq 2,6 \times 10^6$ Дж/м². Внутри фронтальной системы циклогенез активизируется на севере и в центре на фоне пониженного давления (999–1000 гПа), на юге в повышенном поле (≈ 1013 гПа). При этом циклоны образуются на севере территории при значениях кинетической энергии $\geq 0,9 \times 10^6$ Дж/м², а в центре и на юге $\geq 1,3$ – $1,7 \times 10^6$ Дж/м². Запасы энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды минимальны ($0,4$ – $0,7 \times 10^7$ Дж/м²).

2. В теплый период генерация циклонов отмечается на фоне пониженного давления (1000–1002 гПа на севере и в центре, ≥ 993 гПа – на юге) и инициируется при достижении в тропосфере значений энергии фазовых переходов воды $\geq 1,0 \times 10^7$ Дж/м², только на юге территории МЦ фронтального характера могут образовываться при меньших значениях энергии ($\geq 0,5 \times 10^7$ Дж/м²). При этом запасы кинетической энергии минимальны ($0,6$ – $0,7 \times 10^6$ Дж/м²).

3. В переходные сезоны циклогенез (как внутримассовый, так и фронтальный) может проходить на фоне пониженного атмосферного давления (1000–1006 гПа), в центре – при более низких значениях (≥ 988 гПа). При этом над болотистым севером в поле повышенного давления (≥ 1023 гПа) формируются внутримассовые МЦ. Определяющий фактор энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, причем наибольшие запасы ($1,0$ – $1,1 \times 10^7$ Дж/м²) отмечаются у фронтальных циклонов, формирующихся над болотистыми территориями севера и центра. При этом отмечаются довольно высокие значения кинетической энергии ($0,8$ – $1,0 \times 10^6$ Дж/м²).

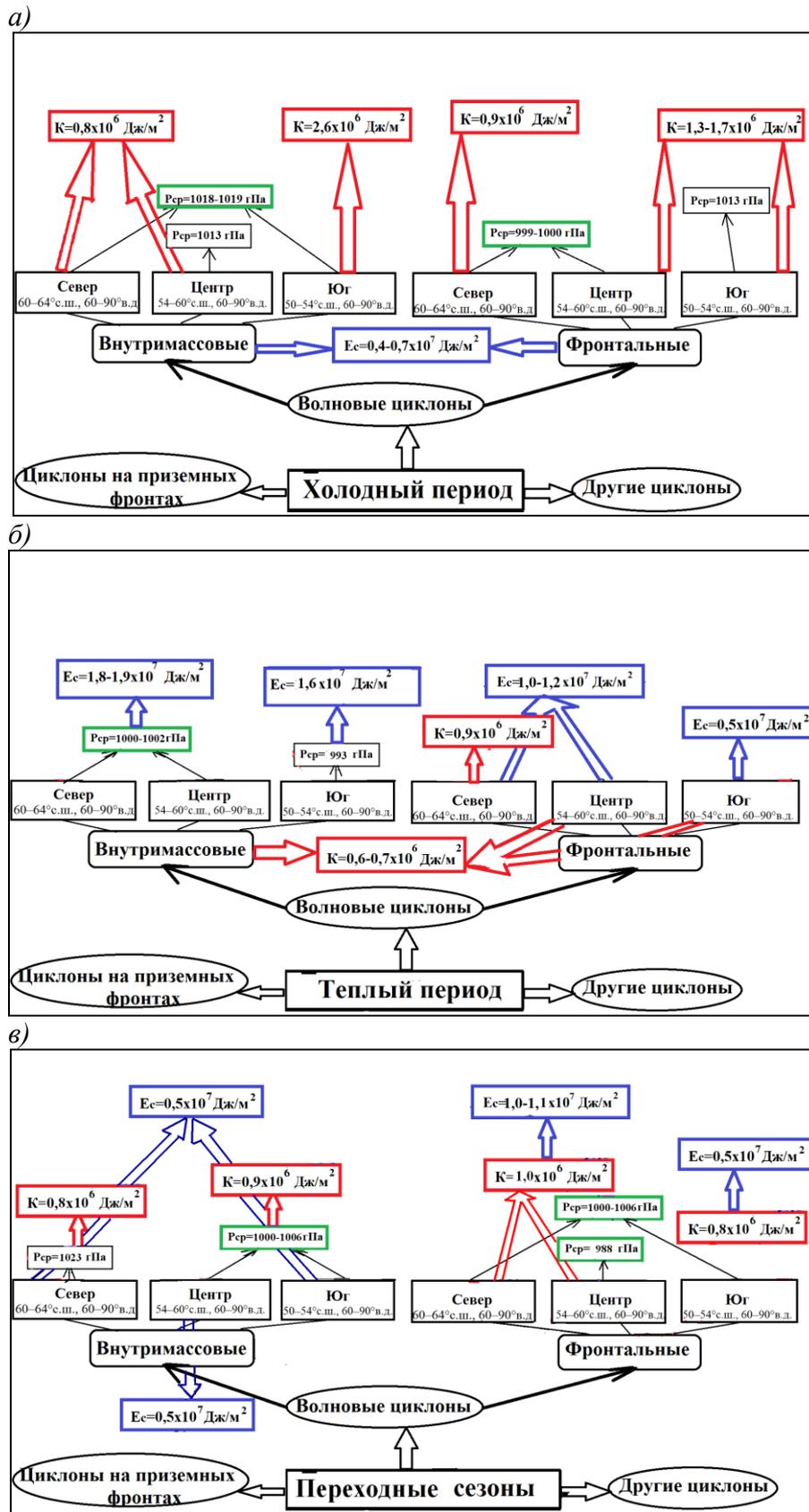


Рис. 5.7. Блок-схема прогностических признаков активизации циклогенеза

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований активности местных циклонов, образующихся в центре и на юге Западной Сибири за более чем 40-ка летний период времени (1976–2017 гг.) были выявлены устойчивые в пространстве и во времени очаги повышенного циклогенеза, проведен анализ синоптических, орографических, энергетических и др. особенностей данных районов. Определены основные наиболее часто встречающиеся виды местных циклонов, произведена оценка влияния макроциркуляционных процессов, а также получены климатические характеристики на фоне глобального изменения климата за последние десятилетия. Были сделаны **основные выводы:**

1. В ходе анализа прогностического материала модели COSMO-RU в дни с местными циклонами получено, что предупреденность факта их формирования составляет 67 %. Определены наиболее характерные ошибки в модельных прогнозах конфигурации барического поля: факт наличия или отсутствия местного циклона, продолжительность его «жизни», интенсивность, местоположение, траектории смещения, степень вертикального развития и др. Также выявлено, что местные циклоны вносят существенные искажения в прогностические поля осадков.

2. Для циклонов, образующихся в центральных и южных районах Западной Сибири определено их происхождение, продолжительность «жизни», степень вертикального развития, минимальное давление в центрах, район образования и траектории смещения. Выявлены физические особенности формирования и развития местных циклонов с разными характеристиками. Выявлено, что до 78 % всех молодых циклонов образуется над болотистыми районами территории. Среди циклонов, классифицированных по происхождению, наибольшее число имеет волновую природу и смещается либо в виде одиночных вихрей (52 %), либо сериями (22 %), при этом в поле облачности они могут представлять из себя как фронтальные, так и внутримассовые вихри. По продолжительности оказываемого влияния чаще всего (74 %) встречаются циклоны период «жизни» которых

составляет до одних суток (74 %). В теплый период над районами Васюганья и его окрестностей формируются наиболее интенсивные и «живущие» продолжительный период (2–3 дня) циклоны.

3. Выявлена сезонная и межгодовая изменчивость повторяемости и суммарной продолжительности «жизни» местных циклонов и причины ее изменчивости. В последнее десятилетие отмечено общее увеличение интенсивности местного циклогенеза, в 2–3 раза превышающее показатели предыдущего периода (1976–2007 гг.), а так же общее углубление и понижение минимального давления в центрах (на 7 гПа). В теплый период сказывается влияние дополнительного прогрева подстилающей поверхности и увеличения влагосодержания атмосферы, вследствие общепланетарного повышения температуры воздуха, в холодный период и переходные сезоны – отмечается общее увеличение циклонической активности вследствие влияния Исландской депрессии на севере территории и уменьшения интенсивности Сибирского антициклона на юге.

4. Рассчитаны запасы основных видов энергии в тропосфере за два дня до момента образования местного циклона, в период его «жизни», а также в день, следующий после его полного заполнения. Выявлены повышенные значения кинетической энергии и энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды при формировании и развитии местных циклонов, что может служить диагностическим признаком активизации циклогенеза. Определены пороговые значения этих энергий.

5. В соответствии с пространственными и временными признаками все местные циклоны разделены на классы, что упрощает их прогноз. Выделены характеристики циклонов, оказывающих наиболее интенсивное и продолжительное влияние на погоду Сибири. Внутримассовые местные циклоны формируются в основном в теплый период и переходные сезоны года над болотистыми районами Западной Сибири. Они имеют значительную интенсивность вследствие выделения болотами дополнительной атмосферной влаги, участвующей в процессах циклогенеза. В холодный период чаще всего

формируются фронтальные местные циклоны на фоне повышенных запасов кинетической энергии, это наиболее подвижные барические образования, на пути их движения можно ожидать больших скоростей ветра.

6. Выявлены многолетние устойчивые очаги формирования и развития местных циклонов, построена карта их пространственной локализации. При этом замечено, что в течение года значительная часть циклонов (до 40 %) как внутримассового, так и фронтального происхождения, образуется в районе Большого Васюганского болота и его окрестностей. Физической причиной может быть увеличение бароклинности атмосферы, рост температуры воздуха и ожидаемый рост содержания водяного пара в атмосфере из-за выделений метана, а также повышенные значения энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды.

7. Выявлено, что циклогенез может быть в половине случаев объяснен особенностями макроциркуляционных условий современного периода, в остальных случаях в качестве триггерного механизма могут выступать процессы, происходящие над территориями болот (в том числе над районами Большого Васюганского болота), являющихся поставщиком дополнительной влаги в изменившуюся по температурным характеристикам атмосферу.

8. Составлены блок-схемы и рекомендации по улучшению прогноза погоды в холодный и теплый периоды года, а также в переходные сезоны с учетом образования местных циклонов над территорией ответственности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» и его филиалов, находящихся в центральных и южных районах Западной Сибири.

ПРЕДПОЛАГАЕМОЕ РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для внедрения полученных результатов в практику оперативных прогнозов предполагается разработать программный продукт на основании составленных в настоящей работе блок-схем прогностических признаков активизации процессов циклогенеза над центральными и южными районами Западной Сибири.

Отдельного внимания заслуживают вопросы регенерации циклонов, приходящих на территорию Западной Сибири. Есть основание полагать, что процессы регенерации могут быть запущены увеличением неустойчивости приземного слоя атмосферы над территориями болотных систем Западной Сибири, в особенности над Большим Васюганским болотом.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Др. – другие

гПа – гектопаскаль, условная единица измерения атмосферного давления

Км – километры

Гг. – годы

ВСВ – всемирное скоординированное время

ФГБУ – Федеральное государственное бюджетное учреждение

ЗС УГМС – Западно-Сибирское Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ГМЦ – гидрометцентр

НИЦ Планета – Научно-исследовательский центр «Планета»

ЗС РИВЦ – Западно-Сибирский региональный информационно-вычислительный центр

СибНИГМИ – Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт

АТ–200, АТ–500 – карты абсолютной топографии на уровнях 200 и 500 гПа

ОЯ – опасные явления погоды

КМЯ – комплекс неблагоприятных явлений погоды

Млн – миллионы

Га – гектар

БВБ – Большое Васюганское болото

°С – градус Цельсия

М – метр

С.ш. – северная широта

В.д. – восточная долгота

ЦДА – центры действия атмосферы

ЭС – экспоненциальное сглаживание

Т.д. – так далее

WSIBMZ – технология прогноза осадков атора М.Я. Здеревой

ЕЦСПП – Европейским центр среднесрочных прогнозов погоды

США – Соединенные штаты Америки
ЮАР – Южно-Африканская республика
ЦФО – Центральный Федеральный округ
Гб. – гигабайт
АНО – автономная некоммерческая организация
НСО – Новосибирская область
гдм – геопотенциальные декаметры
МЦ – местный циклон
ЦУШ – циклоны умеренных широт
ВФЗ – высотная фронтальная зона
ЕТР – Европейская территория России
 S_{np} – суммарная продолжительность
 S_{nm} – суммарная повторяемость
 P_c – среднее давление
 C_{np} – средняя продолжительность
 C_{nm} – средняя повторяемость
 K – кинетическая энергия
 Π – потенциальная энергия
 I – внутренняя энергия
 E_c – энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды
 V – вектор скорости ветра
 dm – элемент массы
 z – высота
 $R = 287$ Дж/(кг К) – универсальная газовая постоянная сухого воздуха
 $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения
 C_v – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме (Дж/кг К)
 T и P – температура (К) и давление воздуха (гПа)
 W – массовая доля водяного пара (г/кг)
 $L = 2,49 \times 10^6$ Дж/кг – скрытая теплота парообразования
 $^{\circ}K$ – градусы Кельвина

Г – грамм

С – секунда

Дж – джоуль

r – коэффициент множественной регрессии

NASA – национальное аэрокосмическое агентство США

-1д – день до момента образования циклона

-2д – второй день до момента образования циклона

1д – день образования циклона

+1д – день после полного заполнения циклона

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменко М.Ф., Алехина Н.В., Горбатенко В.П. и др. Региональный мониторинг атмосферы. Часть 4. Природно-климатические изменения / под ред. М.В. Кабанова. Томск: РАСКО. 2000. 270 с.
2. Алферов Д.Ю., Ривин Г.С. Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU: Ансамблевый прогноз // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2011. № 346. С. 5–16.
3. Андерсон Р.К., Ашмен Дж. Р., Вельтищев Н.Ф. и др. Использование изображений со спутников в анализе и прогнозе погоды: Техническая записка ВМО №124 / под. ред. Р.К. Андерсона, Н.Ф. Вельтищева. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 275 с.
4. Анцыпович В.А., Лубов С.В. Модернизация центров обработки оперативной гидрометеорологической информации Росгидромета // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 28–37.
5. Астахова Е.Д. Построение ансамблей начальных полей для системы кратко- и среднесрочного ансамблевого прогнозирования погоды // Труды Гидрометцентра России. 2008 Вып. 342 С. 98–117.
6. Аухадеев Т.Р. Пространственно-временные изменения приземного давления воздуха в Северном полушарии в 1948–2013 гг. // Ученые записки Казанского университета. 2015. кн. 3: Естественные науки. Т. 157. С. 20–34.
7. Багров Н.А., Кондратович К.В., Педь А.А. и др. Долгосрочные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 247 с.
8. Белов П.Н., Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В. Численные методы анализа и прогноза погоды. Казань: Изд-во Каз. ун-та. 1991. 84 с.
9. Блинов Д.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU: Технологические аспекты визуализации и распространения прогнозов // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2011. № 346. С. 53–61.

10. Блохина В.И. Авиационные прогнозы погоды: учебное пособие по дисциплине «Авиационные прогнозы». Владивосток: Дальнаука. 2000. С. 34–45.
11. Бордовская Л.И. Характеристика синоптических процессов над Западной Сибирью. // Проблемы гляциологии Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та. 1974. С. 95–117.
12. Бордовская Л.И., Цибульский А.Е. Повторяемость и скорость движения циклонов и антициклонов над Западной Сибирью // Вопросы географии Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та. 1976. Вып. 9. С. 22–29.
13. Борисенков Е.П. Вопросы энергетики атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат. 1960. 167 с.
14. Бухаров М.В., Алексеева А. Диагноз гроз по синхронной информации спутниковых радиометров микроволнового и ИК-излучения // Метеорология и гидрология. 2005. Вып. 6. С.127.
15. Бухаров М.В., Кухарский А.В., Мисник Л.А. Автоматизированное рабочее место «Планета-метеобзор» для мониторинга опасных атмосферных явлений, связанных с конвективной облачностью // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 64–69.
16. Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Особенности динамики климата Северного полушария в XX столетии // Доклады Академии наук. 2002. Т. 384. № 5. С. 674–681.
17. Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. №1 С. 5–14.
18. Васильев П.П., Васильева Е.Л., Веселова Г.К. и др. Метод прогноза преобладающей минимальной и максимальной температуры воздуха, детализированного по территории семи федеральных округов России и республики Беларусь. Информационный сборник: Результаты испытания новых усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов // Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации. 2009. № 36. С. 43–57.

19. Васюганское болото. Природные условия, структура и функционирование / 2-е изд. под ред. Л.И. Инишевой. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2003. 136 с.

20. Ветров А.Л. Трансформация доступной потенциальной энергии в циклонах вследствие фазовых переходов воды. Пермь: Изд-во Перм. ун-та. 2007. 100 с.

21. Виноградова Л.И. Прогноз погоды и вопросы авиационной метеорологии // Западно-Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт. М.: Гидрометеоиздат. 1989. Вып. 90. С. 42–46.

22. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Современные оперативные системы численного прогноза погоды для ограниченной территории. Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института / под ред. В.Н. Крупчатникова, О.В. Климова; Мин-во природ. Ресурсов и экологии РФ, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2011. Вып. 106. С. 5–12.

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

24. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат. 1976. 360 с.

25. Гиндуллин Ф.А., Горбатенко В.П. Исследование региональных распределений интенсивности грозовой деятельности. Характеристики грозовых воздействий и молниезащита // Сб. трудов ЭНИНа. М. 1989. С. 5–11.

26. Гирс А.А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л.: Гидрометеоиздат. 1960. 560 с.

27. Глебова С.Ю. Зимний циклогенез над океаном как фактор последующих изменений в атмосферном и термическом режиме дальневосточных морей и СЗТО (со сдвигом один год) // Известия ТИНРО. 2012. Т. 170. С. 136–150.

28. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов / 10-е издание, стереотипное. М.: Высшая школа. 2004. 479 с.

29. Горбатенко В.П., Войлокова Е.С., Сорокина С.А. Некоторые характеристики конвекции над юго-востоком Западной Сибири в дни с грозой // материалы конференции: Седьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск: Аграф-Пресс. 2007. С. 49–51.
30. Горбатенко В.П., Дульзон А.А. Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность // География и природные ресурсы. 1997. № 2. С. 142–146.
31. Горбатенко В.П., Дульзон А.А. Результаты исследования грозовой активности над территорией Томской области // Известия Томского политехнического университета. 2006. №2. С. 126–130.
32. Горбатенко В.П., Дульзон А.А., Решетько М.В. Пространственные и временные вариации грозовой активности над Томской областью // Метеорология и гидрология. 1999. № 12. С. 21–28.
33. Горбатенко В.П., Ершова Т.В., Константинова Д.А. Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над Западной Сибирью // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 329. С.215–221.
34. Горбатенко В.П., Ершова Т.В. Молния как звено глобальной электрической цепи. Томск: Изд-во ТГПУ. 2011. С. 110–112.
35. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. и др. Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 1 С. 15–21.
36. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Логинова С.В. и др. Исследование циклонической и антициклонической активности на территории Западной Сибири по данным реанализа NCEP/DOE AMIP-II и синоптических карт // Оптика атмосферы и океана. 2009. № 1 С. 38–41.
37. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Логинов С.В. и др. Роль циркуляционных факторов в потеплении климата Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 346 С. 174–180.

38. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976–2004 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 28–36.
39. Горбатенко В.П., Константинова Д.А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т.22. №1. С.17-21.
40. Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Известия Высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 54. №11/3. С.148–156.
41. Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Тунаев Е.Л. Атмосферика над юго-востоком Западной Сибири // тез. докл.: Аэрозоли Сибири. XVI Рабочая группа. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. 2009. С. 47–48.
42. Горбатенко В.П. Синоптические условия образования и развития гроз над территориями Западной Сибири и Казахстана // Вестник Томского Университета. Томск: ТГУ. 2001. Вып.272. С. 220–223.
43. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Колебания и изменения климата на территории России // Известия РАН: Физика атмосферы и океана. 2003. № 2. С. 166–185.
44. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50–67.
45. Грушевский О.Н., Пшеничный В.Н. Потенциал влагосодержания подстилающей поверхности как механизм формирования мезомасштабных атмосферных Процессов над северным Причерноморьем // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2009. Вып.7. С.140–146.
46. Гурвич И.А., Заболотских Е.В., Пичугин М.К. Особенности мезомасштабного циклогенеза над восточным сектором Евразийской Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 227–237.

47. Гурвич И. А., Митник Л. М., Митник М. Л. Мезомасштабный циклогенез над Японским морем 7–13 января 2009 г. по спутниковым мультисенсорным данным // Исследования Земли из Космоса. 2010. № 4. С. 11–22.

48. Домашенко В.Г., Дульзон А.А., Сараев В.А. Избирательная грозопоражаемость линий электропередачи // Электричество. 1976. №6. 77 с.

49. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. М.: Финансы и статистика. 2000. 79 с.

50. Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. и др. Изменение климата на азиатской территории России во второй половине XX столетия: сравнение данных наблюдений и реанализов // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 11. С. 934–940.

51. Елисеев А.В. Линейные и нелинейные модели бароклинных волн в атмосфере // Нелинейные волны 2016 / Федер. Агентство науч. Орг., Федер. Исслед. центр Ин-т приклад. Физики РАН / Под ред. А.М. Сергеева, А.В. Слюняева. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2017. 320 с.

52. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики: Учебник / Под ред. И.И. Елисеевой. / 4-е издание, переработанное и дополненное. М.: Финансы и Статистика. 2002. 480 с.

53. Журавлев Г.Г., Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л. Метели на территории Томской области // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. С. 137–151.

54. Здерева М.Я., Аникина Н.В., Виноградова М.В. Результаты испытания метода и технологии расчета комплексного прогноза температуры воздуха, осадков и индекса пожарной опасности по административным районам Алтайского края, Томской, Кемеровской областей и Ханты-Мансийского автономного округа на 1–5 суток. Информационный сборник: Результаты испытания новых усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов // Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России. 2012. № 39. С. 101–109.

55. Здерева М.Я., Токарев В.М. Хлучина Н.А. Воробьева Л.П., Бабошина Н.А. Оперативная технология прогноза гроз в Сибири и результаты её испытаний //Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. №2 (368) 2018. С. 27–43.

56. Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Интегральные характеристики ветра над космодромами «Байконур» и «Восточный» // Сб. докладов всероссийской молодёжной научно-практической конференции: «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики». Красноярск. 2018. С. 91–93.

57. Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Характеристики ветра, ограничивающие пуски ракет космического назначения в районе космодромов «Байконур» и «Восточный» // Сборник докладов всероссийской молодёжной научно-практической конференции: «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики». Томск. 2017. С. 61–62.

58. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А. и др. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.

59. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеоздат. 1976. 280 с.

60. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. и др. Структура и динамика метеорологических полей на азиатской территории России в период интенсивного глобального потепления 1975–2005 гг. // Журнал Сибирского федерального университета. 2008. Т. 1. № 4. С. 323–344.

61. Калинин Н. А. Динамическая метеорология. Перм. гос. ун-т. Пермь. РГГМУ. СПб. Изд. второе, испр. Перм. кн. изд-во. 2009. 256 с.

62. Калинин Н.А. Исследование энергетики циклонов умеренных широт // Метеорология и гидрология. 1994. № 5. С. 55–67.

63. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах: монография / Н.А. Калинин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь. 2015. 308 с.

64. Кижнер Л.И., Нахтигалова Д.П., Барт А.А. Использование прогностической модели WRF для исследования погоды Томской области // Вестник Томского Государственного Университета: Науки о Земле. 2012. №358. С. 219–224.

65. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Каримов Р.Р. Исследование грозových разрядов в северной Азии с помощью зондирования сетью пассивных радаров: Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой. Якутск: Изд-во Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН. 2009. С. 613–621.

66. Кононова Н.К. Колебания циркуляции атмосферы в Западной Сибири и наводнение на Алтае в 2014 году / под ред. М.В. Кабанова // Тез. док. XI Сибирского совещания по климато-экологическому мониторингу. Томск. 2015. С. 41–42.

67. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2010. Т. 337. С.184–189.

68. Константинова Д.А., Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л. Конвекция в атмосфере Западной Сибири // труды IX сибирского совещания по климато-экологическому мониторингу. Томск: Изд-во Аграф-Пресс. 2011. С. 126–128.

69. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности // Вычислительные технологии. 2007. Ч. 1. MODIS. Т. 12. № 2. С. 67–78.

70. Лагутин А.А., Лагутин Ал. А., Шмаков И.А. и др. Специализированная ГИС оперативного мониторинга окружающей среды территории и прогнозирования источников природных ЧС // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 3. С. 67–78.

71. Лосев В.М. Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, лтд. 2010. С. 36–58.

72. Луценко Э.И. Полярные мезомасштабные циклоны в атмосфере над Баренцевым и Карским морями // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2. (96) С. 76-89.
73. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат. 2000. 780 с.
74. Минаева Т.Ю., Сири́н А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
75. Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К. и др. Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере // Известия РАН: Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. № 1. С. 11–26.
76. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 24–34.
77. Муравьев А.В., Куликова И.А. Оценка экономической эффективности ансамблей гидродинамических прогнозов на основе вероятностных оценок качества // Метеорология и гидрология. 2004 № 11. С. 17–26.
78. Муравьев А.В., Куликова И.А., Круглова Е.Н. и др. Использование ансамблей в прогнозе метеорологических полей // Метеорология и гидрология. 2005. № 7. С. 5–17.
79. Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 456 с.
80. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Руководящий документ РД 52.27.724. 2009. Обнинск: «ИГ – СОЦИН». 2009. 62 с.
81. Общая теория статистики: Учебник / 3-е издание, переработанное: под ред. Р.А. Шмойловой. М.: Финансы и Статистика. 2002. 560 с.
82. Орлова В.В. Западная Сибирь (Климат СССР, вып. 4) / В.В. Орлова. Л.: Гидрометеиздат. 1962. 360 с.
83. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1: Изменение климата. М.: Росгидромет. 2008. 277 с.

84. Переведенцев Ю.П., Вильфанд Р.М., Шанталинский К.М. Низкочастотные изменения атмосферного давления и приземной температуры воздуха во внетропических широтах Северного полушария // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 5–25.
85. Песков Б.Е. Влияние различных термодинамических условий на развитие гроз и ливней // Труды ЦИП. 1966. Вып. 149. С. 46–58.
86. Песков Б.Е. Исследование метеорологических условий образования гроз последовательным дискриминантным анализом // Труды Гидрометцентра СССР. 1977. Вып.185. С. 24–40.
87. Попова К.И. К вопросу о циркуляции атмосферы над Западной Сибирью в летний период // Труды ГГО. 1964. Вып. 164. С. 64–73.
88. Проблемы гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири (к 40-летию образования СибНИГМИ) / под ред. В.Н. Крупчатникова, О.В. Климова // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2011. Вып. 106. 248 с.
89. Прокопьева И.П. К прогнозу южных циклонов, перемещающихся на территорию Западной Сибири //Труды НРГМЦ. 1969. Вып. 2. С. 50–57.
90. Раков В. А. Современные пассивные радиотехнические системы местоопределения молний // Метеорология и гидрология. 1990. № 11. С. 118–123.
91. Решетов Г.Д. Прогноз дневных и ночных гроз // Труды Гидрометцентра СССР. 1977. Вып. 176. С. 86–99.
92. Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2016. Т. 327. № 4. С. 108-118.
93. Рутковская Н.В. Климатическая характеристика сезонов года Томской области. Томск: Изд-во Томского университета. 1979. 116 с.
94. Сатина Н. В. Погода на территории Российской Федерации в декабре 2016 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 128–133.

95. Сергеева И.И., Чекулина Т.А., Тимофеева С.А. Статистика. М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА. 2006. 272 с.
96. Ситникова Т.С. Условия выхода южных циклонов на районы Западной Сибири // Труды НРГМЦ. 1967. Вып. 1(5). С. 81–88.
97. Ситников И.Г., Полякова И.В. Практическое применение ансамблей гидродинамических прогнозов метеорологических полей // Метеорология и гидрология. 1997. № 8. С. 113–118.
98. Солдатенко С.А. Синоптические вихри в атмосфере и океане // Соросовский научный журнал. 1999. № 2. С. 78–84.
99. Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А. Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 5–17.
100. Суслов В.И., Ибрагимов Н.М., Тальшева Л.П. и др. Эконометрия. Новосибирск: СО РАН. 2005. 744 с.
101. Толстых М.А. Глобальная Полулагранжевая модель численного прогноза погоды. М.: Обнинск: ОАО ФОР. 2010. 111 с.
102. Тунаев Е.Л. Влияние географических особенностей местности на конвективный потенциал атмосферы Западной Сибири // Труды всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: «Наука и образование» ТГПУ. Томск: Изд-во ТГПУ. 2011. Т. 1. С. 231–235.
103. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П. Активность циклогенеза на территории Западной Сибири при различных формах атмосферной циркуляции // XVI конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»: труды конференции. Иркутск. 2019. С. 396–398.
104. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976-2015 гг. // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 364. С. 81–92.

105. Тунаев Е.Л. Горбатенко В.П. Энергетические характеристики атмосферы при циклогенезе над районами Васюганского Болота // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 48–62.

106. Тунаев Е.Л. Горбатенко В.П. Энергия фазовых переходов воды как фактор циклогенеза над Западной Сибирью // Тезисы докладов XIII Сибирского совещания и школы молодых ученых по климато-экологическому мониторингу. Томск. 2019. С. 128–129.

107. Тунаев Е.Л., Константинова Д.А. Влияние физико-географических особенностей местности на конвективный потенциал атмосферы Западной Сибири // Труды международной научно-практической конференции: «Геосистемы: факторы развития, рациональное природопользование, методы управления». Краснодар: Издательский дом Юг. 2011. С. 209–211.

108. Тунаев Е.Л., Константинова Д.А. Молниевая активность над Западной Сибирью // Труды X международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых: «Энергия молодых – экономике России». Томск: Изд-во ТПУ. Ч 4. 2009. С. 172–174.

109. Тунаев Е.Л., Константинова Д.А. Термодинамические характеристики атмосферы при грозах на юго-востоке Западной Сибири // Труды XI международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых: «Энергия молодых – экономике России». Томск: Изд-во ТПУ. Ч 2. 2010. С. 311–313.

110. Тунаев Е.Л. Оправдываемость прогнозов осадков в Алтайском ЦГМС // труды всероссийской молодежной конференции с международным участием. Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс». 2016. С. 295–299.

111. Тунаев Е.Л. Сезонные особенности характеристик циклонов, образующихся над Западной Сибирью // Тезисы докладов XII сибирского совещания и школы молодых ученых по климато-экологическому мониторингу. Томск. 2017. С. 97–98.

112. Тунаев Е.Л., Торубарова Г.П. Оправдываемость методов прогноза осадков, применяемых в оперативной практике ФГБУ «Западно-Сибирское

Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» // Избранные труды международной конференции и школа молодых ученых по изменению, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: *Enviromis 2016*. Томск. 2016. С. 132–136.

113. Тунаев Е.Л. Характеристики циклонов, образующихся над Западной Сибирью, в зависимости от района их формирования // Материалы IV всероссийской научно-практической конференции с международным участием: «Современные проблемы географии и геологии». Томск. 2017. Том 2. С. 95–98.

114. Характеристики ветра и геопотенциала // Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР / Под ред. И. Г. Гутермана. 1979. М.: Гидрометеоиздат. Т 2. 584 с.

115. Характеристики влажности и плотности // Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР / Под ред. И. Г. Гутермана. 1980. М.: Гидрометеоиздат. Т 3. 584 с.

116. Характеристики температуры воздуха // Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР / Под ред. И. Г. Гутермана. 1980. М.: Гидрометеоиздат. Т 1. 292 с.

117. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат. 1990. 309 с.

118. Ягудин Р.А. Грозы на юго-востоке Западной Сибири и их прогноз / Труды ЗСРНИГМИ. 1977. Вып. 30. С. 47–55.

119. Ягудин Р.А. О синоптических и аэрологических условиях ночных гроз в Новосибирской области // Труды НРГМЦ. 1969. Вып. 3. С. 113–120.

120. Ahmadi-Givi F., Graig G. C., Plant R. S. The dynamics of a midlatitude cyclone with very strong latent-heat release // *Q. J. Roy Meteor. Soc.* 2004. Vol. 130 (596), P. 295–323.

121. Andersson T, T. A. M. J. C. N. S.: Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden // *Meteorol. Mag.* 1989. Vol. 116, P.141–146.

122. Blechschmidt A.M. A 2-year climatology of polar low events over the Nordic Seas from satellite remote sensing // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. No. 9. L09815.

123. Charney J.C. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current // *J. Meteorol.* 1947. No. 4 (5). P. 135–162.
124. Chen F., von Storch H. Trends and Variability of North Pacific Polar Lows // *Adv. Meteorol.* 2013. 11 p.
125. Condron A., Renfrew I.A. The impact of polar mesoscale storms on northeast Atlantic Ocean circulation // *Nat. Geosci.* 2012. Vol. 6. No. 1. P. 34–37.
126. Cullather R.I., Bromwich D.H., Serreze M.C. The atmospheric hydrologic cycle over the Arctic Basin from reanalyses. / Part I: Comparison with observations and previous studies // *J. Climate.* 2000. P. 923–937.
127. Davis K.J. Surface Fluxes of Trace Gases Derived from Convective-Layer Profiles, Ph.D: dissertation // University of Colorado NCAR Cooperative Thesis. 1992. 139 p.
128. Emanuel K.A. An air–sea interaction theory for tropical cyclones / Part I: Steady-state maintenance // *J. Atmos. Sci.* 1986.No. 43. P. 585–604.
129. Emanuel K.A. Atmospheric Convection. New York Oxford: Oxford University Press. 1994. 580 p.
130. Ferreira J.A., Liberato M.L.R., Ramos A.M. On the relationship between atmospheric water vapour transport and extratropical cyclones development // *Phys. Chem. Earth.* 2016. No. 94. P. 56–65. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.01.001> (дата обращения: 20.05.2018).
131. Fu G., Hiroshi N., Ryuji K. at all. Polar Low over the Japan Sea on January 1997 / Part I: Observational Analysis // *Mon. Wea. Rev.* 2004. Vol, 132. P. 1537–18.
132. Fu G. Polar lows: Intense cyclones in winter. Qindao, China. 2000. 219 p.
133. Global Hydrology and Climate Center. <http://thunder.msfc.nasa.gov/data>.
134. Harold J.M., Bigg G.R., Turner J. Mesocyclone activity over the northeast Atlantic / Part 1: Vortex distribution and variability // *J. Climatology.* 1999. No. 19 (11). P. 1187–1204.
135. Holton J.R. An introduction to dynamic meteorology. 4th Ed // International Geophysics Series. New York; London: Elsevier-Academic Press. 2004. Vol. 88, 552 p.

136.Hsu W.-R., Murphy A.H. The attributes diagram: A geometrical framework for assessing the quality of probability forecasts // *Int. J. Forecasting*. 1986. Vol. 2. Iss. 3. P. 285–293.

137.<http://nomads.ncdc.noaa.gov/>.

138.Johns R.H., Doswell Wea C. Severe local storms forecasting. *Forecasting*. 1992. P. 558–612.

139.Kain J., Fritsch J. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme // *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteor. Monogr. Boston.: American Meteorological Society. 1993. Vol. 24. No. 46. P. 165–170.

140.Kain J. The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update // *Journal of Applied Meteorology*. 2004. Vol. 43. No. 1. P. 170–181.

141.Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2007. P.327–342.

142.Lorenz E.N. A deterministic non-periodic flow // *J. Atmos. Sci*. 1963. Vol. 20, P. 130–141.

143.Lorenz E.N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model // *Tellus*. 1965. Vol. 17, P. 321–333.

144.Marques C.A.F., Rocha A., Corte-Real J.at all. Global atmospheric energetics from NCEP–Reanalysis 2 and ECMWF–ERA-40 Reanalysis // *Int. J. limatol*. 2009. Vol. 29, P. 159–174.

145.Marsigli C. COSMO Priority Project “Short Range Ensemble Prediction System” (SREPS): Final Report // COSMO Technical Report No. 13. Deutscher Wetterdienst. 2009. 32 p.

146.Molteni F., Buizza R., Palmer T.N. at all. The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation // *Q. J. Roy. Met. Soc*. 1996. Vol, 122 P. 73–119.

147.Montani A., Cesari D., Marsigli C. at all Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges // COSMO Technical Report No. 19. Deutscher Wetterdienst. 2010. 28 p.

148. Ninomiya K. Features of the polar air outbreak and the energy balance in the transformed air-mass observed over the Japan Sea // *J. Meteor. Soc. of Japan*. – 2006. Vol. 84. –No. 3. P. 529–542.

149. Overland J.E., Wang M. Large scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice // *Tellus A*. Vol. 62. No. 1. P. 1–9.

150. Peralta C., Buchhold M. Initial condition perturbations for the COSMO-DE-EPS // *COSMO Newsletter № 11*. Deutscher Wetterdienst. 2011. P. 115–123.

151. Pinto J.R.D., da Rocha R.P. The energy cycle and structural evolution of cyclones over southeastern South America in three case studies // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2011. No. 14. Vol. 116.

152. Pirret J.S.R., Knippertz P., Trzeciak T.M. Drivers for the deepening of severe European windstorms and their impacts on forecast quality // *Q. J. Roy Meteor. Soc.* 2017. No. 143. pp. 309–320. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1002/qj.2923> (дата обращения: 15.06.2018).

153. Pierce C., Seed A., Ballard S., Simonin D., Zhihong Li. Nowcasting // Doppler radar observations – weather radar, wind profiler, ionospheric radar and other advanced applications. InTech. 2012. P. 97–142.

154. Plu M., Arbogast P.A. Cyclogenesis evolving into two distinct scenarios and its implications for short-term ensemble forecasting // *Mon. Wea. Rev.* 2005. No. 13. P. 2016–2029.

155. Rasmussen E.A., Turner J. *Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*. Cambridge: Cambridge University Press. 2003. 612 p.

156. Rojo M., Claud C., Mallet P.E. et al. Polar low tracks over the Nordic Seas: a 14-winter climatic analysis // *Tellus A*. 2015. Vol. 67. 24660. – [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.24660> (дата обращения: 12.06.2018).

157. Schattler U., Brien S. *COSMO-Model-Tutorial*. Offenbach: Deutscher Wetterdienst. 2010. 71 p.

158. Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // *Wea. Forecasting*. 1989. Vol. 4, P.73–80.

159. Simmons A. J., Hoskins B. J. The life cycles of some nonlinear baroclinic waves // *J. Atmos. Sci.* 1978. No. 35 (3). P. 414–432.
160. Talagrand O., Vautraud R., Strauss B. Evaluation of probabilistic prediction systems // *Proceedings of the workshop on predictability.* ECMWF. 1998. P. 1–25.
161. Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models // *Mon. Wea. Rev.* 1989. Vol. 117. No. 8. P. 1779–1800.
162. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method // *Mon. Wea. Rev.* 1997. Vol. 125, P. 3297–3319.
163. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations // *Bull. Am. Met. Soc.* 1993. Vol. 74, P. 2317–2330.
164. Tunaev E. L., Gorbatenko V. P., Kuzhevskaya I. V. Energy of atmospheric processes in a region between the Ob and Irtysh rivers in days of cyclogenesis // *IOP Conf. Series: «Earth and Environmental Science».* 2018. P. 1–9.
165. Yanase W., Niino H., Watanabe S.-ichi I. et al. Climatology of Polar Lows over the Sea of Japan Using the JRA-55 Reanalysis // *J. of Climate.* 2016. Vol. 29. No. 2. P. 419–437.
166. Zahn M., von Storch H. Investigation of Past and Future Polar Low Frequency in the North Atlantic. *Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective* / A.S. Sharma, A. Bunde, V.P. Dimri, D.N. Baker (Eds.) // *Geophys. Monogr. Ser.* 196. Amer. Geophys. Union. 2013. P. 99–110.
167. Zhu Y., Newell R.E. Atmospheric Rivers and Bombs // *Geophys. Res. Lett.* 1999. No. 21 (18). P. 1999–2002.

Исследуемая территория

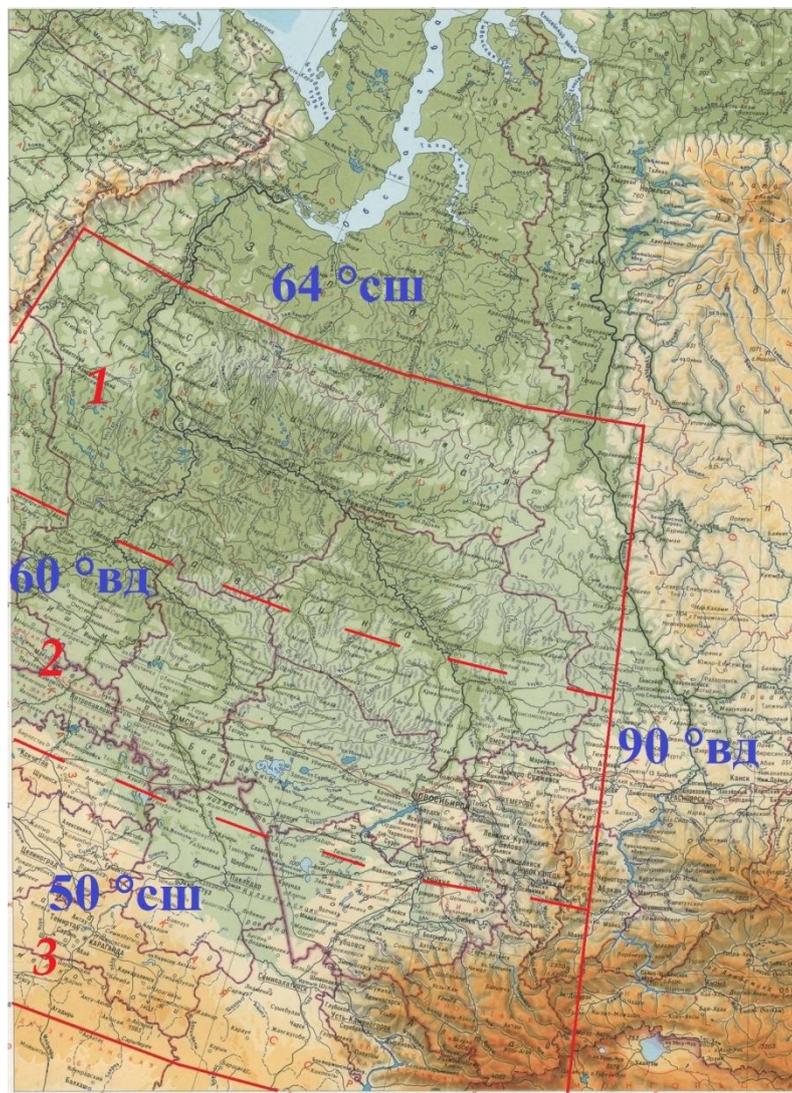


Рис.1 – деление территории на районы: 1 – северные; 2 – центральные; 3 – южные

Прогностические (по модели COSMO-RU) и фактические барические поля

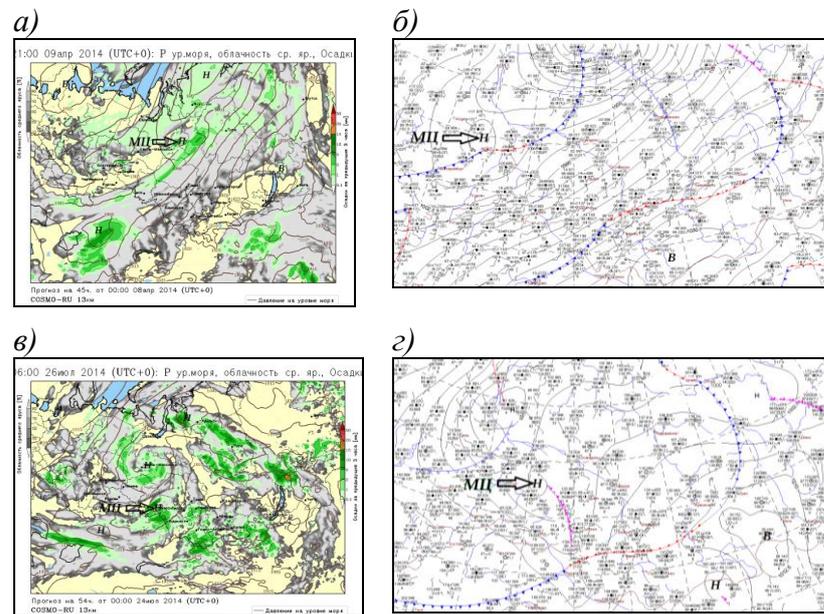


Рис. 1. Барическое поле *а)* – COSMO-RU (21 ВСВ 09.04.2014); *б)* – фактическое (21 ВСВ 08.04.2014); *в)* – COSMO-RU (06 ВСВ 26.07.2014); *г)* – фактическое (21 ВСВ 25.07.2013)

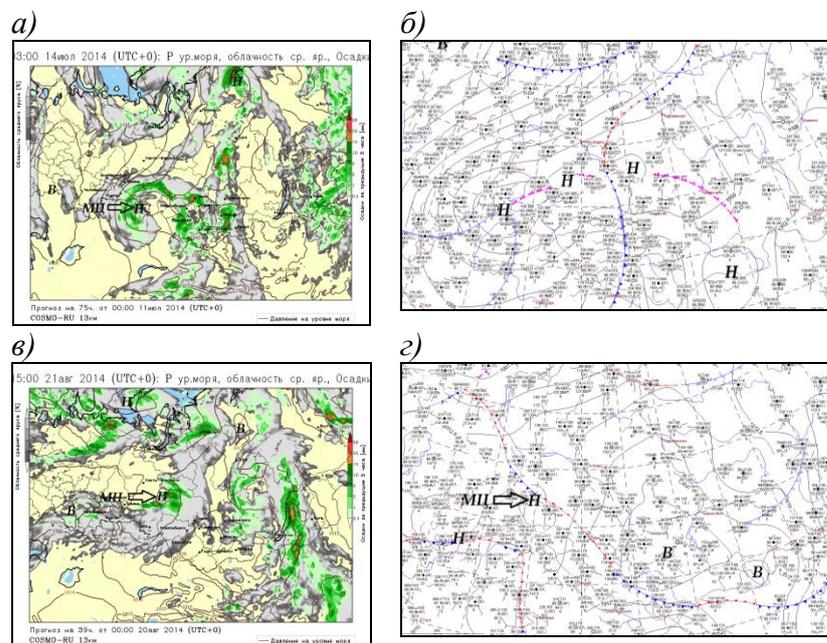


Рис. 2 – Барическое поле за 03 ВСВ 14.07.2014: *а)* – COSMO-RU; *б)* – фактическое; за 15 ВСВ 21.08.2014: *в)* – COSMO-RU и *г)* – фактическое

Прогностические (по модели COSMO-RU) и фактические барические поля

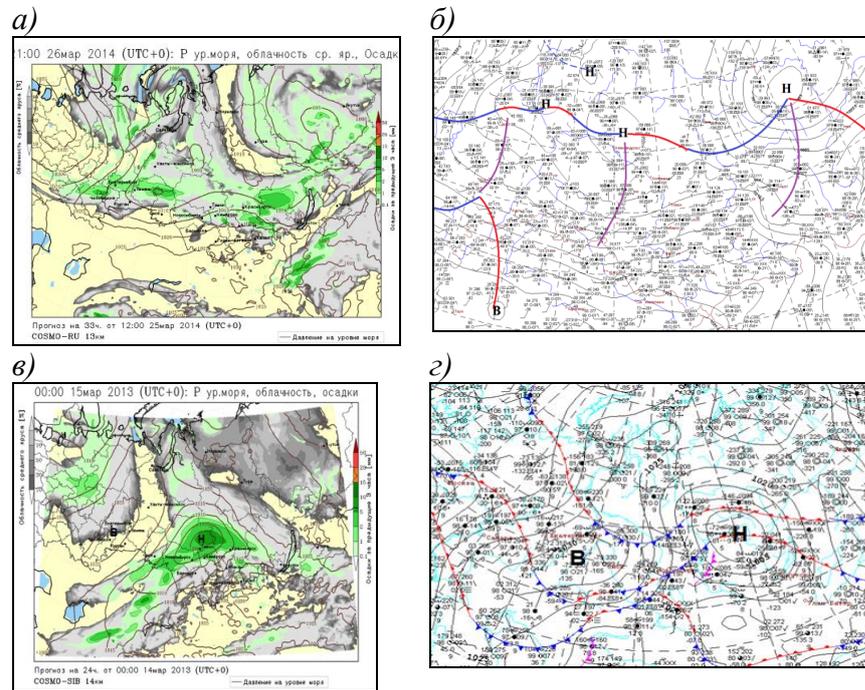


Рис. 3. Барическое поле *а)* – COSMO-RU (21 ВСВ 26.03.2014); *б)* – фактическое (06 ВСВ 26.03.2014); *в)* – COSMO-RU и *г)* – фактическое (12 ВСВ 15.03.2013)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица 1

Прогноз осадков и его оправдываемость по территории Новосибирской области за срок 12 ВСВ

15 марта 2013 года

Станция	Осадки, мм		Оправдываемость, %	
	Прогноз	Факт	Факт	Количество
Кыштовка	0,1	0	0	50
Северное	0,2	0	0	50
Усть-Тарка	0	0	100	100
Венгерово	0,1	0	0	50
Крещенка	2,1	0,1	100	50
Болотное	6,9	2	100	50
Чаны	0,4	0	0	50
Татарск	0,2	0	0	50
Барабинск	1,5	0	0	50
Убинское	2,3	0	0	0
Квашнино	1,6	0	0	50
Ельцовка	7,3	0,8	100	0
Каргат	3,1	0,1	100	50
Чулым	4,7	0,1	100	50
Коченево	5	0,5	100	50
Толмачево	5,9	1	100	0
Колывань	5,6	0,6	100	0
Мошково	7,1	2	100	50
Обская	6,4	2	100	50
Тогучин	6,5	3	100	50
Учебная	6,8	0,9	100	0
Огурцово	7,1	0,8	100	0
Чистоозерное	1	0	0	50
Купино	1,6	0	0	0
Баган	1,4	0	0	50
Здвинск	2,4	0	0	0
Довольное	4,1	0	0	0
Ужаниха	5,6	0,1	100	0
Остров Дальний	5,9	1	100	0
Кочки	5,1	0,1	100	50
Ордынское	6	0,3	100	0
Искитим	7,3	2	100	50
Посевная	7,5	0,6	100	0
Маслянино	7,3	5	100	50
Красноозерск	3,6	0	0	0
Карасук	1,3	0	0	50
Сузун	7,4	8	100	100
Итого	148	31	59,5	33,8

Случаи образования местных циклонов

Период «жизни» циклона	Давление в центре циклона (гПа)		Продолжительность «жизни» циклона (дней)	Район образования	Траектории смещения
	P_{min}	σ			
2–4.01.2014	1006	4	3	север	на восток
2–3.01.2014	1010	8	2	центр	на северо- восток
8–9.01.2015	991	11	2	центр	на север
14.01.2016	1017	15	1	север	на север
13.01.2016	1005	3	1	север	на север
11–12.02.2014	1029	27	2	север	на юго- восток
12.02.2016	1030	28	1	центр	на юг
18–19.02.2014	991	11	2	север	на северо- восток
19.02.2017	1017	15	1	юг	на северо- восток
28.02.2015	1015	13	1	север	на юго- восток
3–4.03.2014	1032	30	2	север	на юго- восток
05.03.2016	1025	23	1	юг	на юг
6–9.03.2014	1005	3	4	север	на восток
27–28.03.2014	987	15	2	север	на восток
1–2.03.2016	1009	7	2	юг	на северо- восток
7–8.04.2014	973	29	2	центр	на север
9–10.04.2014	988	14	2	север	на северо- восток

Случаи образования местных циклонов

Период «жизни» циклона	Давление в центре циклона (гПа)		Продолжительность «жизни» циклона (дней)	Район образования	Траектория смещения
	P_{min}	σ			
12–13.04.2016	1003	1	2	центр	на юго- восток
23–24.04.2016	998	4	2	север	на север
24–25.04.2016	1007	5	2	центр (БВБ)	на юго- восток
2–3.05.2016	1005	3	2	центр	на юго- восток
9–10.05.2015	985	17	2	центр	юз
16–18.05.2014	997	5	3	центр (БВБ)	юз
17–18.05.2016	1012	10	2	север	с
23–25.05.2014	986	16	2	север	юз
28–29.05.2015	999	3	2	север	юз
08.06.2017	1004	2	1	север	ю
10–11.06.2015	1009	7	1	центр	юз
13–15.06.2015	992	9	2	центр	юз
18.06.2017	997	5	1	север	на юго- восток
24–26.06.2014	1002	1	3	юг	малоподви- жный
4–10.07.2017	990	12	7	север	юз
12–15.07.2014	991	11	4	центр	на юго- восток
18–19.07.2014	1002	1	2	центр (БВБ)	юз
23–24.07.2015	1003	1	2	центр (БВБ)	юз

Случаи образования местных циклонов

Период «жизни» циклона	Давление в центре циклона (гПа)		Продолжительность «жизни» циклона (дней)	Район образования	Траектория смещения
	P_{min}	σ			
26–27.07.2014	997	4	2	центр (БВБ)	юз
27–29.07.2015	989	12	3	центр	на юго- восток
28–29.07.2014	993	9	2	север	на северо- восток
3–6.08.2017	990	12	4	центр	на северо- восток
6–8.08.2016	1002	1	3	север	на северо- восток
7–9.08.2017	985	17	3	север	на север
13.08.2015	998	3	1	центр	на восток
28–29.08.2016	1002	0	3	центр (БВБ)	ю
09.09.2016	997	4	1	юг	ю
16–17.09.2017	998	4	2	север	на восток
16–18.09.2014	990	12	3	центр	на северо- восток
17–20.09.2014	983	19	4	юг	на север
20–22.09.2017	999	3	3	север	на восток
17.10.2015	1019	17	1	центр (БВБ)	на северо- восток
20–21.10.2015	1006	4	2	центр	на северо- восток
28.10.2016	1034	32	1	север	на юг
30.10.2015	1005	3	1	север	на север
10.11.2015	1013	11	1	центр (БВБ)	на северо- восток

Случаи образования местных циклонов

Период «жизни» циклона	Давление в центре циклона (гПа)		Продолжительность «жизни» циклона (дней)	Район образования	Траектория смещения
	P_{min}	σ			
9–10.11.2016	1000	2	2	центр	на восток
10–12.11.2016	1006	4	3	юг	на северо- восток
25–26.11.2015	1013	11	2	центр (БВБ)	на северо- восток
15–16.12.2016	999	3	2	центр	на северо- восток
23.12.2016	1018	16	1	юг	на юг
24–25.12.2015	996	6	2	центр	на северо- восток
29.12.2015	993	9	1	центр (БВБ)	на северо- восток

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица 1

Список станций аэрологического зондирования

Станция	Индекс
Александровское	23955
Барабинск	29612
Барнаул	29839
Братск	30309
Ванавара	24908
Верхнее Дуброво (Екатеринбург)	28445
Емельяново (Красноярск)	29572
Ивдель	23921
Караганда	35394
Курган	28661
Кустанай	28951
Киренск	30230
Колпашево	29231
Красноярск	29572
Кызыл	36096
Новосибирск	29634
Омск	28698
Павлодар	36003
Пермь	28225
Салехард	23330
Семипалатинск	36177
Тура	24507
Туруханск	23472
Тобольск	28275
Ханты-Мансийск	23933
Хакасская	29862

Соотношение значений энергий в циклонах, классифицированных по различным признакам

Вид энергии	Кинетическая, 10 ⁶ Дж/м ²		Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, 10 ⁷ Дж/м ²	
	Характеристика, общее число (%)	ср (σ)	макс	ср (σ)
По району образования				
Северные районы (52)	0,8 (0,3)	1,5	1,3 (0,6)	2,6
Центральные районы включая БВБ (23–40)	0,8 (0,3)	2,3	1,0 (0,6)	2,3
Южные районы (21)	1,3 (0,7)	2,6	0,9 (0,5)	2,3
По происхождению				
Волновые циклоны (52)	0,9 (0,4)	2,2	0,9 (0,5)	2,6
Серии циклонов (22)	1,0 (0,4)	2,6	1,0 (0,5)	2,4
Циклоны на приземных фронтах (13)	0,4 (0,2)	0,6	0,8 (0,5)	1,3
Другие циклоны (13)	0,5 (0,1)	0,7	1,1 (0,6)	1,5
По продолжительности «жизни»				
1 сутки (74)	0,9 (0,4)	2,6	0,8 (0,5)	2,4
2–3 дня (22)	0,9 (0,3)	2,3	1,0 (0,6)	2,6
4–7 дней (4)	0,6 (0,3)	1,0	1,0 (0,4)	1,6

Сезонные характеристики местных циклонов

Вид циклона		Внутримассовые					
Район образования		север	центр	юг	север	центр	юг
Период года		Холодный			Теплый		
Давление в центре, гПа	ср (σ)	1019(8)	1013(8)	1018(1)	1002(6)	1000(5)	993(9)
	мин	1005	996	1017	993	989	983
Продолжительность жизни, дней	ср (σ)	1,4 (0,5)	1,5 (0,5)	1 (0)	2,2 (0,6)	1,7 (0,6)	3 (1,0)
	макс	2	2	1	3	3	4
Кинетическая энергия, 10 ⁶ Дж/м ²	ср (σ)	0,8 (0,2)	0,8 (0,3)	1,7 (1,0)	0,6 (0,1)	0,7 (0,3)	0,6 (0,2)
	макс	1,3	1,4	2,6	0,8	1,4	1,4
Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, 10 ⁷ Дж/м ²	ср (σ)	0,4 (0,1)	0,6 (0,2)	0,5 (0,2)	1,9 (0,5)	1,8 (0,5)	1,6 (0,6)
	макс	0,5	0,8	0,7	2,6	2,4	2,2
Вид циклона		Фронтальные					
Период года		Холодный			Теплый		
Давление в центре, гПа	ср (σ)	999(8)	1000(5)	1013(8)	993(5)	990(7)	998(6)
	мин	987	990	1006	985	973	998(988)
Продолжительность жизни, дней	ср (σ)	2 (0,4)	2,2 (0,6)	2 (0,7)	2,4 (1,0)	2,4 (0,6)	1,0 (0,3)
	макс	3	3	3	7	4	1,4
Кинетическая энергия, 10 ⁶ Дж/м ²	ср (σ)	0,9 (0,3)	1,3 (0,4)	1,7 (0,6)	0,9 (0,3)	0,7 (0,1)	0,6 (0,2)
	макс	1,6	2,3	2,2	1,8	0,9	0,8
Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, 10 ⁷ Дж/м ²	ср (σ)	0,5 (0,1)	0,6 (0,1)	0,7 (0,2)	1,2 (0,5)	1,0 (0,6)	0,5 (0,4)
	макс	0,6	0,8	1,1	2,4	2,1	1,1

Влияние общей циркуляции атмосферы на процессы циклогенеза над Западной Сибирью

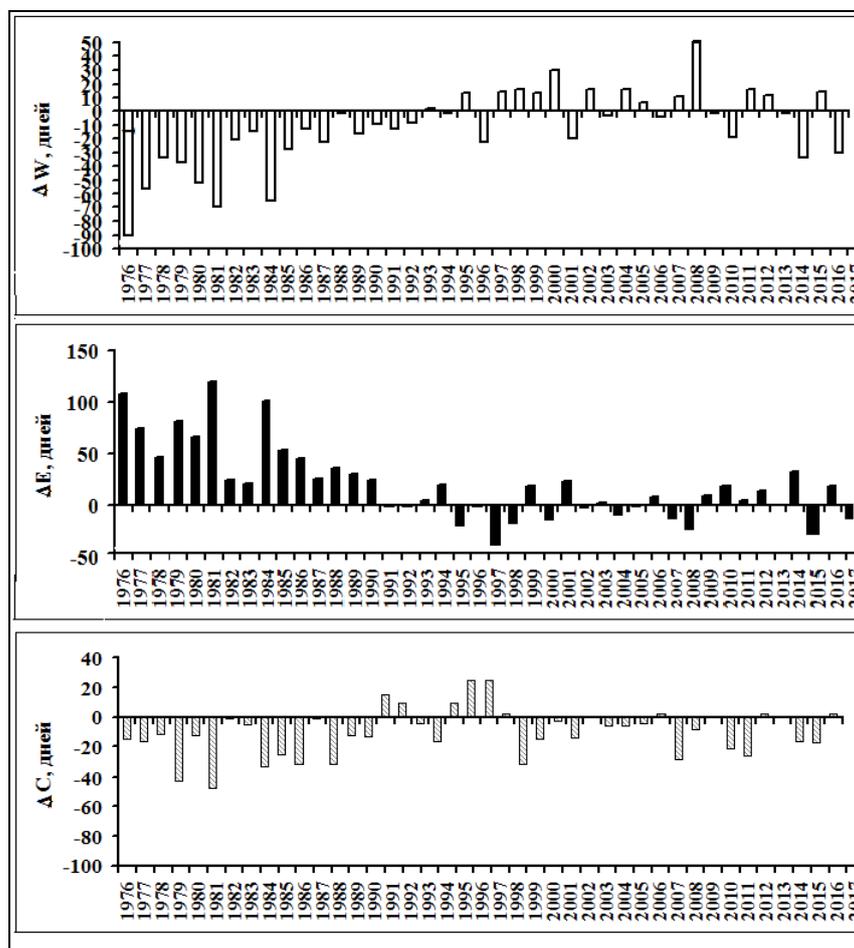


Рис. 1 – Отклонения различных форм атмосферной циркуляции от нормы 1900–2010 гг.

Влияние общей циркуляции атмосферы на процессы циклогенеза над Западной Сибирью

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между характеристиками общей циркуляцией атмосферы и активностью местных циклонов

Характеристика	Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Зональная циркуляция (индекс Блиновой)		-0,13	-0,14	-0,10	0,14	-0,40	-0,23	0,42	0,12	-0,04	-0,14	0,01	0,14
Центры действия атмосферы	Понта-Дельгада (38°с.ш., 26°з.д.)	0,14	-0,33	-0,23	0,15	-0,20	0,20	0,10	-0,03	0,18	0,25	0,03	0,10
	Стиккисхоульмюр (65°с.ш., 23°з.д.)	0,24	0,33	0,01	0,23	0,32	0,05	0,10	0,31	-0,15	-0,23	-0,02	0,03
	Кола (Мурманск) (69°с.ш., 33°з.д.)	0,05	0,23	-0,10	0,33	0,19	-0,24	-0,05	-0,03	0,19	-0,15	-0,04	0,26
	Ташкент (41°с.ш., 69°в.д.)	-0,05	0,06	0,31	0,18	0,20	-0,01	0,05	0,00	-0,26	0,11	-0,05	0,16

*Полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции с вероятностью не менее 95 %.