

Тунаев Евгений Леонидович

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

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Пермь – 2020

Работа выполнена на кафедре метеорологии и климатологии ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Горбатенко Валентина Петровна

Официальные оппоненты: **Семенов Евгений Константинович**
доктор географических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
профессор кафедры метеорологии и климатологии (г. Москва)

Пищальникова Евгения Владимировна

кандидат географических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО Пермский государственный национальный исследовательский университет,
доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы, (г. Пермь)

Ведущая организация: ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт» (г. Новосибирск)

Защита состоится 20 февраля 2020 г. в 15.30 на заседании диссертационного совета Д 212.189.10 при ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, корп. 8, ауд. 215, email: meteo@psu.ru, факс (342)239-63-54.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеки Пермского государственного национального исследовательского университета. Электронная версия текста диссертации и автореферата доступна на сайте ПГНИУ по адресу: <http://www.psu.ru> и официальном сайте ВАК РФ.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, кандидат
географических наук, доцент

Татьяна Анатольевна Балина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Западная Сибирь относится к территориям с активной циклонической деятельностью, 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, что составляет 20 % 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. Анализ многолетней динамики циклонической активности на территории Западной Сибири показал, (В.П. Горбатенко, И.И. Ипполитов, Н.В. Поднебесных) что происходит увеличение повторяемости местных циклонов, вследствие чего актуально исследовать:

1) Насколько изменилась активность циклогенеза над Западной Сибирью в последние десятилетия по сравнению с ранними исследованиями (К.И. Попова, Л.И. Бордовская, 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, 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: К.И. Попова, Л.И. Бордовская, 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 ($50\text{--}64^\circ\text{с.ш.}$, $60\text{--}90^\circ\text{в.д.}$) определить следующие характеристики: происхождение, продолжительность «жизни», степень вертикального развития, 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 физических причин, обуславливающих наличие этих центров.

7. Составить рекомендации по улучшению прогноза погоды с учетом образования местных циклонов над исследуемой территорией.

Объектом исследования является слой атмосферы от поверхности земли до верхней границы тропосферы 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:

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 построены карты пространственного положения 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 зарождения местных циклонов. 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 климато-экологическому 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 ENVIROMIS, 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 климато-экологическому 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 работ, включая 4 статьи в журналах из списка ВАК РФ (из них 2 статьи в российских журналах, входящих в Web of Science), а также 1 работа в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus.

Личный вклад автора. Все анализируемые результаты работы получены автором лично. Самостоятельно составлена и проанализирована база данных по характеристикам 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 и библиографического списка, включающего 167 наименований, в

том числе 47 зарубежных. Общий объем работы составляет 144 страницы. Работа содержит 31 цветной и черно-белый рисунок и 5 таблиц.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Неучтенный циклогенез является одной из главных причин ошибок прогноза полей осадков над центральными и южными районами Западной Сибири.

Значительная часть рассматриваемой территории относится к зоне ответственности ФГБУ «Западно-Сибирского УГМС» и его филиалов. В оперативной практике для прогноза погоды синоптиками используются различные модели, основные из которых – ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) и COSMO-RU. Для прогноза отдельных метеорологических величин, особое место среди которых занимают осадки, используются автоматизированные методы, технологии расчета разработанные ФГБУ «СибНИГМИ», Гидрометцентром России, а также международным консорциумом COSMO.

Замечено, что интенсивные фронтальные осадки прогнозируются с достаточной эффективностью, а внутримассовые, зачастую не поддаются прогнозированию. Они, в основном, связаны с влиянием циклонов, тем не менее, 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», 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 местных циклонов, в том числе, необходим анализ положения основных барических образований в случаях неоправдавшихся прогнозов. Для этого было произведено сравнение прогностических барических полей у поверхности земли и на уровне АТ-500 и полей облачности и осадков с фактическими данными для территории Сибири, а также оценка эффективности прогнозов осадков для территории Новосибирской области и г. Новосибирск за 2013–2017 гг.

В целом качество прогноза формирования местных циклонов по модели COSMO-RU оценивается как удовлетворительное (предупрежденность факта формирования составила 67 %). 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.

Также стоит отметить, что моделью в большинстве случаев (67 %) неверно прогнозируется продолжительность «жизни» местных циклонов. 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 местного циклона, 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 местных циклонов. 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.

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.

Таблица 1

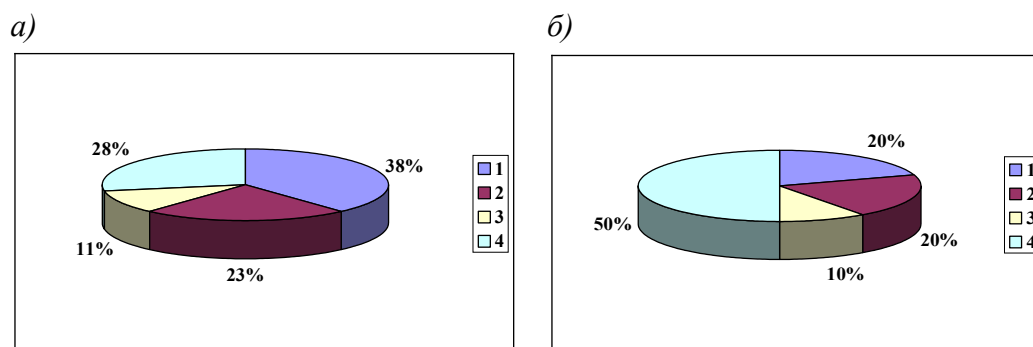
Повторяемость различных ошибок в прогнозе барических полей по модели COSMO-RU для территории Новосибирской области за 2013–2017 гг.

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 зона	6

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.

Подробный анализ прогнозов факта и количества осадков, позволил выявить характерные ошибки в модельных и оперативных прогнозах (рис. 1).

Так в дни с местными циклонами 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 наблюдаемого.



1 – «ложный» прогноз, 2 – непредусмотренные осадки,
3 – количество больше факта, 4 – количество меньше факта
Рис. 1. Виды ошибок прогноза (из числа неоправдавшихся прогнозов) осадков в дни циклогенеза: а) COSMO-RU (46); б) оперативный (10)

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.

2. Повторяемость циклонов, образовавшихся в междуречье Обь-Иртыш, имеет сезонный ход и межгодовую изменчивость, а также тенденцию на увеличение в последнее десятилетие.

Для центральных и южных районов Западной Сибири автором предложена методика идентификации местных циклонов, выраженных в барическом поле и в поле облачности. Для выявления разных по генезису групп местных циклонов была произведена их классификация по различным формальным признакам. Местные циклоны, 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 в этом случае основными циклонами. При этом в подавляющем большинстве случаев (99 %) формируются новые циклоны, регенерация старых отмечается менее чем в 1 % случаев и проходит на фоне более низкого давления.

Поскольку выявлено значительное количество ошибок в модельных прогнозах локализации центров местных циклонов, рассматриваемая территория была разделена на три части: болотистый север (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.). Обнаружено (рис. 2) превышение числа циклонов, формирующихся на севере (52 %) и в центральных районах территории (26 %), отмечающееся как во внутригодовом, так и в межгодовом ходе.

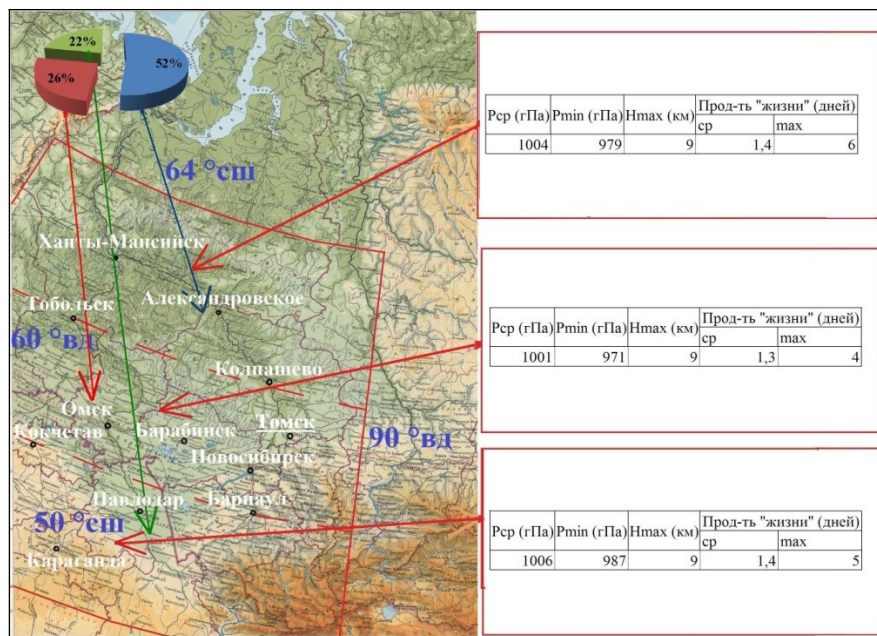


Рис. 2. Характеристики местных циклонов в зависимости от района образования

По причине наличия ошибок в прогнозах начала и окончания формирования местных циклонов, а также *продолжительности их влияния*, они были поделены на три группы: с продолжительностью «жизни» до одних суток; «живущие» 2–3 дня; с продолжительностью «жизни» 4–6 дней. Выявлено (рис. 3а), что циклоны, «живущие» в течение одних суток (74 %) формируются, в основном, на севере территории. 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.

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.

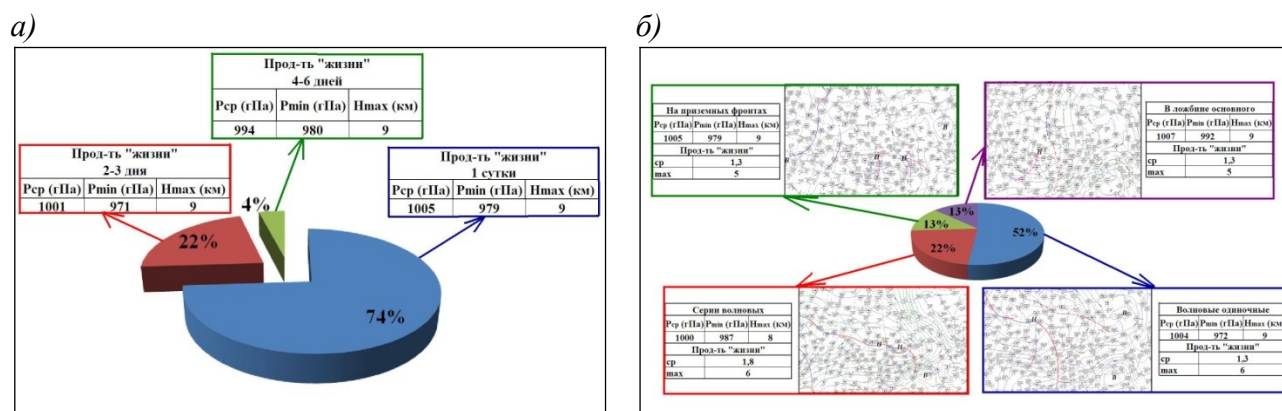


Рис. 3. Характеристики циклонов, классифицированных: а) по продолжительности «жизни»; б) по происхождению

По характеру синоптической ситуации было выделено 4 основных вида циклонических вихрей: циклоны, образовавшиеся на волнах фронтальных систем; несколько образовавшихся одновременно, или поочередно заполняющихся и вновь образующихся циклонов (серия волновых циклонов); циклоны на вторичных (приземных) фронтах; другие циклоны (в ложбине основного и малоподвижные). Выявлено (рис. 3б), что, что чаще всего циклоны имеют волновую природу, в 52 % случаев они представляют собой одиночные вихри, а в 22 % смещающиеся сериями. Это наиболее глубокие и одни из самых развитых по вертикали местных циклонов.

Местные циклоны, выраженные в поле облачности, были поделены: на внутримассовые и фронтальные. Замечено, что циклонам (рис. 4а), образовавшимся на волнах размытых сильно окклюдированных фронтальных разделов (80%), на спутниковых снимках соответствуют внутримассовые циклоны (рис. 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 %).

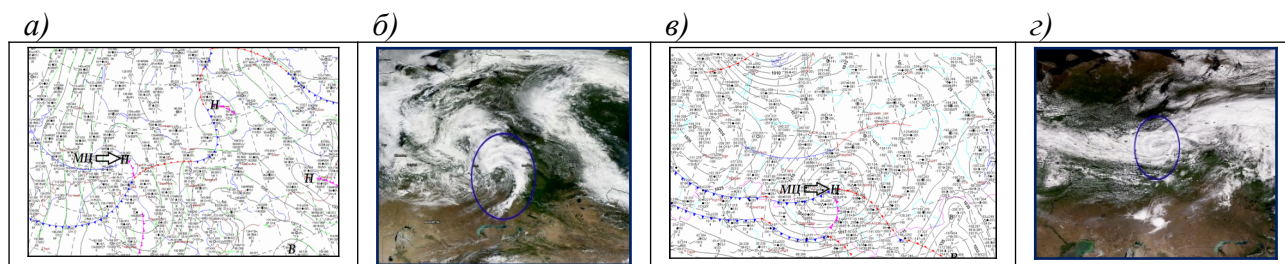


Рис. 4. Местные циклоны: внутримассовый (27.07.2015) а) – на кольцевой карте, б) – в поле облачности; фронтальный (10.11.2016): в) – на кольцевой карте, г) – в поле облачности

Местным циклонам, сформировавшимся на волнах развитых фронтальных разделов (рис. 4в), чаще всего в составе основных холодных фронтов, в поле облачности соответствуют фронтальные вихри (рис. 4г). 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.

При анализе многолетней динамики и сезонных особенностей (рис. 5) формирования циклонов в междуречье Обь-Иртыш было выявлено, что за год их образуется, в среднем, около 25 (8 в холодный, 7 в теплый периоды и 10 в переходные сезоны). Межгодовая повторяемость и продолжительность «жизни» местных циклонов имеет квазициклический характер (рис. 5а). При этом в последнее десятилетие общее число и продолжительность их влияния оказались в 2–3 раза больше, чем за предыдущий период (1976–2007 гг.), так же отмечено общее углубление и понижение минимального давления в центрах (рис. 5б). Оно уменьшалось практически параллельно с ростом средней годовой температуры воздуха Западной Сибири (рис. 5г) и обнаруживает с ним значимую корреляционную связь (вероятность 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.

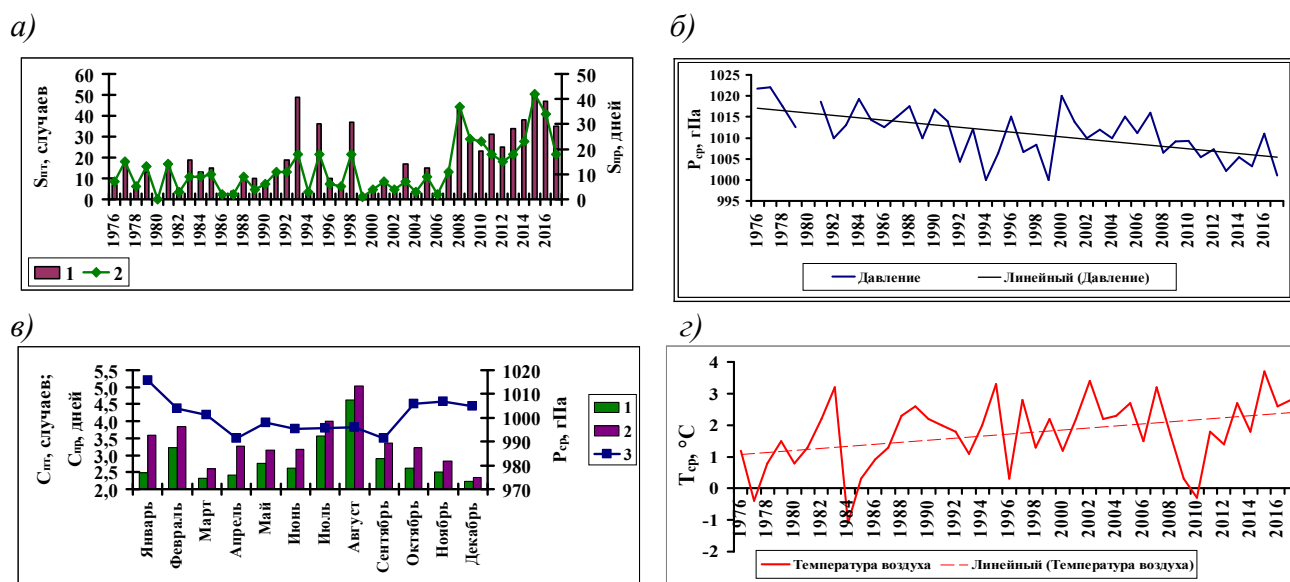


Рис. 5. а) Суммарная: 1 – продолжительность влияния (S_{np}), 2 повторяемость образования местных циклонов (S_{nm}); б) – среднее значение давления (P_c); в) – Средние: 1 – повторяемость (C_{nm}); 2 – продолжительность «жизни» местных циклонов (C_{np}); 3 – давление (P_c); г) Среднегодовая температура воздуха (T_{cp}), г. Новосибирск

Во внутригодовом распределении (рис. 5в) большее число и наибольшая продолжительность «жизни» местных циклонов приходится в основном на теплый период, а максимум процессов генерации циклонов отмечается в августе (в среднем 5 случаев с продолжительностью «жизни» более 5 дней), когда подстилающая поверхность прогревается особенно сильно. 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.

В холодный период часто происходят блокирующие процессы и местные циклоны, как правило, образуются в относительно повышенном поле давления. Тем не менее, замечено некоторое увеличение числа местных циклонов во вторую половину зимы (январь–февраль), что, возможно, связано с активной циклонической деятельностью на севере Западной Сибири и Европейской территории России. По-видимому, сказывается влияние Исландской депрессии, которая является одним из основных центров действия атмосферы и генератором циклонов, приходящих в центральные и южные районы Западной Сибири с севера. За последние 7 лет обнаружено увеличение числа циклонов, сформировавшихся на юге ($50\text{--}54^\circ\text{с.ш.}$, $60\text{--}90^\circ\text{в.д.}$) в холодную часть года, в центральных районах болото ($54\text{--}60^\circ\text{с.ш.}$, $60\text{--}90^\circ\text{в.д.}$) – в теплую часть года.

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 периоды и переходные сезоны соответственно). Из ранних работ (Л.И. Бордовская) следовало, что большая их часть (около 60 %) образовывалась в теплый период, на остальные сезоны приходилось только лишь 40 %. Тем не менее, на фоне формирования пониженного поля атмосферного давления отмечаются два пика генерации циклонов. Основной вызван значительным прогревом подстилающей поверхности в теплый период, дополнительный – увеличением общей циклонической активности вследствие повышенного влияния Исландской депрессии в холодный период.

3. Местные циклоны могут быть обнаружены по высоким показателям запасов кинетической энергии и энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды.

Кроме синоптического подхода, в анализе механизмов формирования и развития местных циклонов также важна оценка запасов энергии 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. Наиболее важными для атмосферных процессов синоптического масштаба видами энергии являются:

- 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_c .

Значения энергий рассчитывались для единичного столба атмосферы на стандартных высотах или для главных изобарических поверхностей.

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):

$$K = \frac{1}{2g} \int_p^{P_0} V^2 dp, \quad (1)$$

В условиях земной атмосферы под *потенциальной энергией* понимают энергию, определяемую положением единицы массы воздуха в поле силы тяжести Земли на высоте z , отсчитываемой от поверхности уровня океана $z_0=0$:

$$\pi = \frac{R}{g} \int_p^{P_0} T dp - zp, \quad (2)$$

Внутренняя энергия определяется кинетической энергией движения молекул и является функцией температуры, атмосфера по своим свойствам принимается близкой к идеальному газу:

$$I = \frac{C_v}{g} \int_p^{P_0} T dp, \quad (3)$$

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

$$E_c = \frac{L}{g} \int_p^{P_0} W dp, \quad (4),$$

В уравнениях (1)–(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 (1)–(4) были рассчитаны для района аэрологической станции, располагающейся в области циклона, для слоев, находящихся между основными изобарическими поверхностями от поверхности Земли до уровня 200 гПа и относящихся к единице площади. Для уравнений (1)–(4) производилась линейная интерполяция метеорологических полей в центр барического образования (местного циклона) по нескольким точкам:

$$X_0 = \sum_{i=1}^n a_i x_i; \quad a_i = \frac{C}{R_i}; \quad C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n C_i}; \quad C_i = \frac{1}{R_i}, \quad (5),$$

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

В ходе анализа запасов энергии в атмосфере в дни с местными циклонами различных групп было выявлено, что они лучше всего проявляют себя в значениях кинетической энергии и энергии скрытой теплоты фазовых

переходов воды, так как только эти виды энергии претерпевают наибольшие изменения (табл. 2). При этом изменения потенциальной и внутренней энергии в течение года, как у местных, так и приходящих циклонов, статистически не значимы. Максимальные запасы кинетической энергии ($2,6 \times 10^6$ Дж/м²) отмечаются у волновых циклонов (рис. 6), формирующихся в холодный период, что в 2–4 раза превышает показатели остальных местных циклонов, и объясняется влиянием ВФЗ и струйных течений, с которыми связаны значительные контрасты температуры и давления. Эти значения в 1,5 раза меньше аналогичных показателей энергий для циклонов, формирующихся в других районах.

Таблица 2

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(0,1)	0,6	0,7(0,5)	2,6
Холодный	1,5(0,8)	2,6	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

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 (54 – 64° с.ш., 60 – 90° в.д.), куда входит Большое Васюганское болото, что объясняется дополнительными поступлениями влаги, участвующей в процессе циклогенеза. Тем не менее, эти значения в 2 раза меньше аналогичных значений энергий для циклонов, смещающихся с других районов.

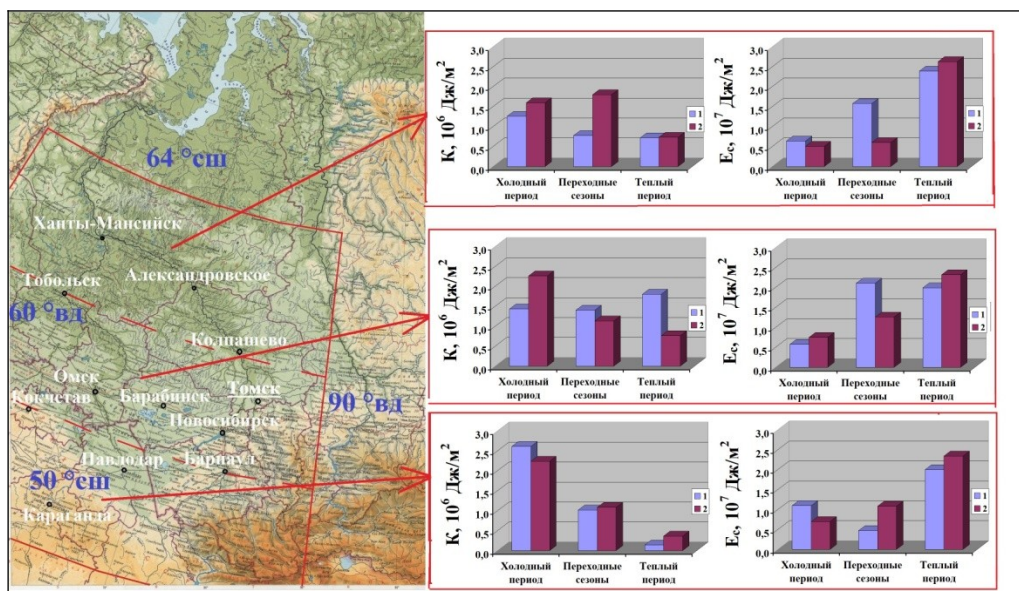


Рис. 6. Максимальные запасы энергии местных циклонов: 1 – внутримассовые, 2 – фронтальные

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

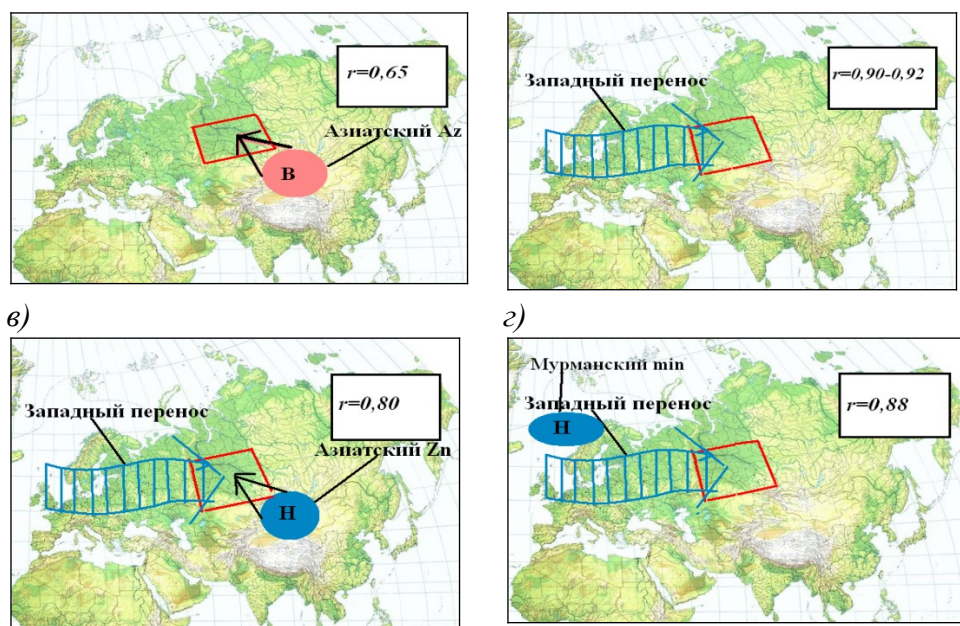
4. Активность циклогенеза над центральными и южными районами Западной Сибири на 50 % определяется макроциркуляционными процессами, в остальных случаях – местными факторами, решающими из которых могут быть процессы, происходящие над территориями болот.

Для анализа общей картины циклогенеза в центральных и южных районах Западной Сибири рассмотрена его взаимосвязь с макроциркуляционными процессами. Рассматривалась синоптическая обстановка, данные о преобладающих формах циркуляции атмосферы (классификация Г.Я Вангенгейма-А.А. Гирса), положении ВФЗ, значения индекса Блиновой. Оценивалось влияние центров действия атмосферы (Понта-Дельгада, Стиккисхоульмюр, Кола (Мурманск), Иркутск, Ташкент), а также ледовитости Баренцева моря за 1976–2017 гг. Был проведен корреляционный (по классификациям Фехнера, Пирсена и др.) и регрессионный анализы между значениями повторяемости крупномасштабных процессов и циклогенезом в исследуемом регионе.

При анализе изменения индекса зональной циркуляции, а также влияния центров действия атмосферы было обнаружено, что в 50 % случаев (февраль, март, апрель, май, июнь и август) они могут определять процессы формирования циклонов на 65–92 % (рис. 7). Для выявления особенностей формирования местных циклонов в остальных случаях был применен кластерный анализ (с помощью двух методов – иерархического и *k*-средних (*k*-mean)).

а)

б)



r – коэффициент регрессии

Рис. 7. Влияние общей циркуляции атмосферы на циклогенез над Западной Сибирью:
а) февраль, март; б) июнь, август; в) апрель, г) май

Оценка разбиения проходила на основании функционалов качества – суммарная внутриклассовая дисперсия и сумма внутриклассовых расстояний. При этом выделились три достаточно плотно сгруппированных класса (расстояние между классами превышает внутриклассовые более чем в два раза (от 7,3 до 13,6)). Далее было проведено обобщение ареалов формирования местных циклонов, в которые были включены не менее 95 % из числа объектов, принадлежащих рассмотренным классам, схема которого приведена на рис. 8. Выявлено, что в течение года значительная часть местных циклонов (до 40 %) как внутримассового (1 класс), так и фронтального происхождения (2 класс), образуется в районе Большого Васюганского болота и его окрестностей.

Для оценки механизмов влияния болотных систем на процессы циклогенеза был произведен анализ накопления и трансформации запасов энергии в течение «жизни» местных циклонов, а также за два дня до момента их образования и в день после полного заполнения.



Черной линией ограничена территория Большого Васюганского болота
Рис. 8. Ареалы образования местных циклонов (МЦ), отнесенных к разным классам

Выявлено, что отмечается накопление энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды (E_c) над территорией Васюганья, особенно заметное в теплый период на стадии появления волны на основном фронте и оформления молодого циклона. Над другими районами центра и юга Западной Сибири этот процесс слабо прослеживается или полностью отсутствует. Все это может говорить о существенном вкладе болот в процессы современного изменения климата.

Таким образом, местный циклогенез на 50 % (февраль, март, апрель, май, июнь и август) определяется изменениями общей циркуляции атмосферы (рис. 8). В остальных случаях главную роль играют именно местные факторы, решающими из которых могут быть процессы, происходящие над территориями болот. Непосредственно над районами Большого Васюганского болота наблюдается активный циклогенез, как на линии фронтальных разделов, так и внутримассовый, физической причиной которого является энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды.

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. 9):

1. В холодный период возможно формирование циклонов в малоградиентном поле повышенного давления (1013–1019 гПа). Решающим фактором являются средние запасы кинетической энергии: на севере и в центре территории $\geq 0,8 \times 10^6$ 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 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 местные циклоны 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 циклоны. Определяющий фактор – энергия

скрытой теплоты фазовых переходов воды, причем наибольшие запасы ($1,0\text{--}1,1 \times 10^7$ Дж/м²) отмечаются у фронтальных циклонов, формирующихся над болотистыми территориями севера и центра. При этом отмечаются довольно высокие значения кинетической энергии ($0,8\text{--}1,0 \times 10^6$ Дж/м²).

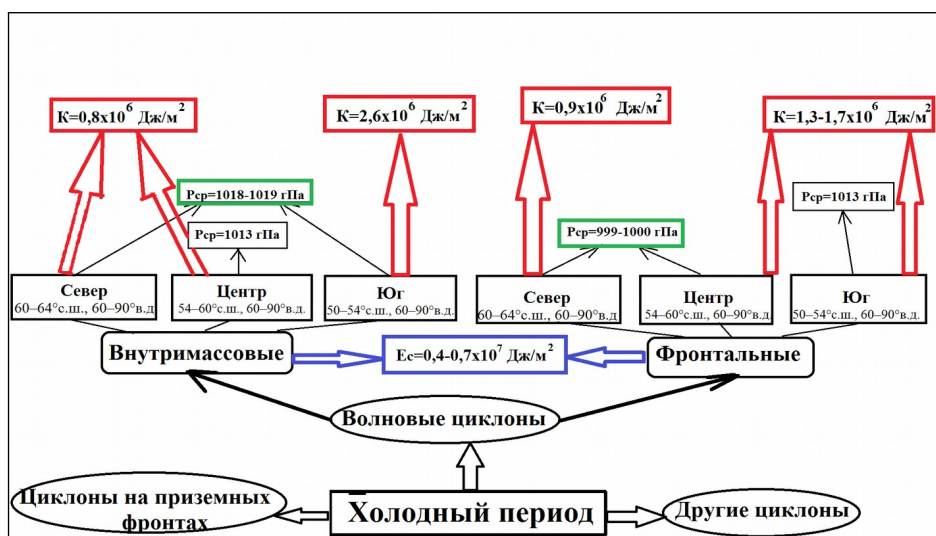


Рис. 9. Блок-схема прогностических признаков активизации циклогенеза

Заключение

Получены следующие результаты.

1. В ходе анализа прогностического материала модели COSMO-RU в дни с местными циклонами получено, что предупрежденность факта их формирования составляет 67 %. Определены наиболее характерные ошибки в модельных прогнозах конфигурации барического поля: факт формирования 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. Получено, что в среднем за год над болотистыми районами территории образуется до 20 циклонов (78 % всех местных циклонов). 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 собой как фронтальные, так и внутримассовые вихри. По продолжительности оказываемого влияния чаще всего (74 %) встречаются циклоны с периодом «жизни» 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 увеличение 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, при достижении которых инициируется циклогенез.

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. Замечено, что в течение года значительная часть циклонов (до 10 ежегодно) 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, являющихся поставщиком дополнительной влаги в изменившуюся по температурным характеристикам атмосферу.

8. Составлены блок-схемы и рекомендации по улучшению прогноза погоды в различные сезоны года с учетом образования местных циклонов над территорией центра и юга Западной Сибири.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

1. 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. Том 54. № 11/3. С.148–155.

2. **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.

Web of Science: Tunaev E. L., Gorbatenko V.P., Podnebesnykh N.V. Distinctive features of cyclogenesis over the territory of western Siberia during 1976–2015 // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. Vol. 364. 2017. P. 81–92.

3. **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.

Web of Science: Tunaev E. L., Gorbatenko V.P. Energy characteristics of the atmosphere during cyclogenesis over the Vasyugan Swamp // Hydrometeorological Research and Forecasting. 2018. No. 4 (370), P. 48–62.

4. Журавлев Г.Г., Горбатенко В.П., **Тунаев Е.Л.** Метели на территории Томской области // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 594. С. 137–151.

Публикации в других научных изданиях:

5. **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». Vol. 211: International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems: Enviromis – 2018. 2018. P. 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012014.

6. **Тунаев Е.Л.**, Константинова Д.А. Молниевая активность над Западной Сибирью // Энергия молодых – экономике России: труды X Международной научно-практической конференция студентов и молодых ученых. Томск, 2009. С. 172–174.

7. **Тунаев Е.Л.**, Константинова Д.А. Термодинамические характеристики атмосферы при грозах на юго-востоке Западной Сибири // Энергия молодых – экономике России: сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых. Томск, 2010. С. 311–313.

8. Константинова Д.А., Горбатенко В.П., **Тунаев Е.Л.** Конвекция в атмосфере Западной Сибири // Девятое сибирское совещание по климато-

экологическому мониторингу: материалы российской конференции. Томск, 2011. С. 126–128.

9. **Тунаев Е.Л., Константинова Д.А.** Влияние физико-географических особенностей местности на конвективный потенциал атмосферы Западной Сибири // Геосистемы: факторы развития, рациональное природопользование, методы управления: сборник научных статей по материалам II Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию со дня основания филиала РГГМУ в г. Туапсе. Краснодар, 2011. С. 209–211.

10. **Тунаев Е.Л., Константинова Д.А.** Влияние географических особенностей местности на конвективный потенциал атмосферы Западной Сибири // I Всероссийский фестиваль науки. Всероссийская с международным участием конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование»: материалы конференции. – Т. 1: Естественные и точные науки. Томск, 2011. С. 231–235.

11. **Тунаев Е.Л., Торубарова Г.П.** Оправдываемость методов прогноза осадков, применяемых в оперативной практике ФГБУ «Западно-Сибирское Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» // *Enviromis* 2016. Международная конференция и школа молодых ученых по изменению, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: сборник трудов. Томск, 2016. С. 132–136.

12 **Тунаев Е.Л.** Оправдываемость прогнозов осадков в Алтайском ЦГМС // Географические исследования молодых ученых в регионах Азии: материалы Всероссийской молодежной конференции с международным участием. Барнаул, 2016. С. 295–299.

13. Золотухина О.И., **Тунаев Е.Л.** Характеристики ветра, ограничивающие пуски ракет космического назначения в районе космодромов «Байконур» и «Восточный» // Всероссийская молодёжная научно-практическая конференция «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики»: сборник докладов. Томск, 2017. С. 61–62.

14. **Тунаев Е.Л.** Характеристики циклонов, образующихся над Западной Сибирью, в зависимости от района их формирования // Современные проблемы географии и геологии: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете. Томск, 2017. С. 95–98.

15. **Тунаев Е.Л.** Сезонные особенности характеристик циклонов, образующихся над Западной Сибирью // Двенадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: тезисы докладов. Томск, 2017. С. 97–98.

16. Золотухина О.И., **Тунаев Е.Л.** Интегральные характеристики ветра над космодромами «Байконур» и «Восточный» // «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики [Электронный ресурс]: сборник материалов Всероссийской молодёжной научно-практической конференции. Красноярск, 2018. С. 91–93. URL: <https://apak.sibsau.ru/page/materials>.

17. Волкова М.А., **Тунаев Е.Л.**, Кужевская И.В., Чурсин В.В. Формирование опасных метеорологических явлений при местном циклогенезе Западной Сибири // Системы контроля окружающей среды – 2019: тезисы докладов Международной научно-технической конференции. Севастополь, 2019. С. 133.

18. **Тунаев Е. Л.**, Горбатенко В. П. Активность циклогенеза на территории Западной Сибири при различных формах атмосферной циркуляции // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике: труды XVI Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2019. С. 396–398.

19. **Тунаев Е. Л.**, Горбатенко В. П. Энергия фазовых переходов воды как фактор циклогенеза над Западной Сибирью // Тринадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции. Томск, 2019. С. 128–129.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

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

1.1 Физико-географические особенности территории

1.2 Общая характеристика циклонов

1.2.1 Механизмы формирования и стадии развития

1.2.2 Классификация циклонов

1.2.3 Погодные условия в разных частях циклона

1.3 История изучения циклонической активности

1.3.1 Изучение циклогенеза над различными районами Северного полушария

1.3.2 Изучение циклогенеза над Западной Сибирью

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

2.1.1 Оценка связи рядов данных

2.1.2 Методы осреднения и экстраполяции данных

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

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

2.2.1 Методы и технологии прогноза метеорологических элементов

2.2.2 Модель прогноза погоды COSMO-RU

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

последствий

3. ЦИКЛОГЕНЕЗ В ЦЕНТРЕ И НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

3.1 Идентификация местных циклонов

3.1.1 Циклоны, выраженные в барическом поле

3.1.2 Циклоны, выраженные в поле облачности

3.2 Характеристики циклонов, образовавшихся в междуречье Обь-Иртыш

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

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

4.1 Основные виды энергии

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

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

5.1 Связь местных циклонов с общей циркуляцией атмосферы

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

5.3 Роль болот в формировании климата территории

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ