

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ



В.В. Степанов

**ПОЛЯРНЫЕ ФРОНТАЛЬНЫЕ
И АРКТИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ
В ПОЛЕ ОБЛАЧНОСТИ**

Санкт-Петербург
ААНИИ
2022

УДК 551.515.1
ББК 26.236
С79

Степанов В.В.

Полярные фронтальные и арктические циклоны в поле облачности.
— СПб: ААНИИ, 2022. — 136 с., ил.

ISBN 978-5-98364-112-9

Рецензент: Г.Г. Шукин, д-р физ.-мат. наук профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Заслуженный метеоролог Российской Федерации

Представлен обзор моделей жизненного цикла атмосферных циклонов. Помимо хорошо известной модели норвежской метеорологической школы, рассмотрены другие модели, которые описывают формирование поля облачности, наблюдаемое с борта метеорологических искусственных спутников Земли. Эти модели слабо освещены в отечественной литературе, но широко используются в мировой научной и прикладной практике (модели Карлсона, Браунинга, Шапиро — Кейзера, в том числе гипотеза о циркуляционном диполе). Основное внимание уделено рассмотрению комплексного анализа процесса циклофронтогенеза.

Издание может быть использовано широким кругом научных работников, специалистами по метеорологии, океанологии и гидрологии в качестве справочного пособия, а также студентами, обучающимися по указанным специальностям.

ISBN 978-5-98364-112-9

© Государственный научный центр РФ
Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт, 2022
© В.В. Степанов, 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Публикация настоящего издания преследует двойную цель: во-первых, дать читателям общее представление о методологии синтеза двух научных дисциплин — синоптической и спутниковой метеорологии; во-вторых, осветить ряд вопросов, которые оказались в настоящее время наименее освещенными при их синтезе.

Снижение фактора опасности, обусловленной погодными условиями, является одной из проблем оперативного гидрометеорологического обеспечения во многих отраслях экономики, безопасности и обороноспособности.

Формирование наиболее сложных метеорологических условий связано с циклонами и атмосферными фронтами. В области циклонической циркуляции наблюдаются наибольшая повторяемость и максимальная интенсивность опасных явлений погоды и сочетания неблагоприятных метеорологических условий.

Наиболее сложными для прогноза метеорологических условий являются барические образования синоптического масштаба.

Различные подходы (гидродинамический, физико-статистический и синоптический) к анализу погоды и прогнозу образования циклонов адаптируются к особенностям местных физико-географических условий. Исследования, направленные на дальнейшее изучение механизмов циклогенеза и фронтогенеза, продолжают во всем мире непрерывно.

К настоящему времени, кроме норвежской модели жизненного цикла атмосферных циклонов, в мире разработан ряд современных моделей, мало известных отечественным синоптикам. Они разработаны на основе спутниковой информации. Их описанию в настоящей монографии посвящены главы 3—5.

В первой главе монографии изложена история развития синоптической метеорологии и обосновано понятие континуума предметной области. Это дало возможность парадигмой жизненного цикла атмосферного циклона описать процесс дешифрирования. Представлено описание моделей некоторых облачных образований.

Во второй главе приведено описание норвежской модели жизненного цикла внетропических циклонов (волновая теория). В ней описаны роль воздушных масс и фронтов в формировании полярных атмосферных циклонов и динамика их развития.

В третьей главе описывается создание двух моделей внетропического циклона — Т. Карлсона и К. Браунинга. Несмотря на то что модели не

доработаны до уровня жизненного цикла, они основаны на результате из-энтропического анализа, что позволило восстановить тонкую трехмерную структуру среднеширотного фронтального циклона.

Четвертая глава содержит описание следующей по активности применения после волновой теории модели жизненного цикла внетропических циклонов Шапино — Кейзера. Модель была разработана в конце 1980-х годов на основе анализа космических снимков, полученных с помощью метеорологических спутников Земли и численного моделирования. Она была названа по имени авторов исследования, впервые ее представивших. Модель точнее описывает быстрое (взрывное) углубление циклона во время его развития.

Авторы модели обнаружили, что для некоторых типов циклогенеза структура поля облачности не подтверждает классическую норвежскую модель фронтального циклона, где процесс окклюзии является результатом слияния холодного и теплого фронтов. В частности, наблюдался перелом холодного фронта в том месте, где он в соответствии с теорией должен плавно переходить в теплый. Сформировавшаяся Т-образная область стала отличительным признаком новой модели. Другой ее важной характеристикой является моделирование реально наблюдаемой на снимках теплой изолированной области — секлюзии, возникновение которой не предусмотрено в норвежской модели циклонов.

Концепция атмосферного циркуляционного диполя является ключевой темой пятой главы. Изучение циркуляционных систем с помощью средств дистанционного зондирования стало возможным после экспериментально установленного факта: каждой стадии развития атмосферного циклона должны соответствовать определенные типы структуры поля облачности.

Модель формирования циркуляционного диполя позволяет интерпретировать формирование циклонического и антициклонического движения при интрузии любого потока в воздушную массу. При значительных по размеру интрузиях могут формироваться атмосферные циклонические и антициклонические вихри синоптического масштаба.

Шестая глава посвящена описанию механизмов формирования арктических циклонов и мезоциклонов. Механизм формирования арктических циклонов заключается в формировании циркуляционного диполя. Описаны результаты экспериментов с созданным и запатентованным автором настоящей работы лотком Миловича. Показаны принципиальные трудности изучения мезоциклонов. Особые надежды на успешность их преодоления возлагаются на запуск на высокоэллиптическую орбиту второго космического аппарата «Арктика-М», съемка с которого может производиться с интервалом 15 минут. Такой интервал даст возможность восстановить этапы жизненного цикла арктических мезоциклонов и построить модель их жизненного цикла.

Издание подготовлено и осуществлено при выполнении плана работ ФГБУ «ААНИИ» по п. 5.1 Плана научно-исследовательских, технологических и других работ Росгидромета для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на 2022 год.

Глава 1

МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОГО ПОДХОДА В СПУТНИКОВОЙ СИНОПТИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

1.1 . ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СИНОПТИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Историю развития спутниковой синоптической метеорологии следует рассматривать гораздо шире, чем просто историю изучения атмосферы. Открытие атмосферных циклонов в XIX веке, установление закономерностей их развития сыграли определяющую роль в анализе и прогнозе погоды. Это стало поворотным пунктом в развитии метеорологии. Синоптическая метеорология (*synopsis* в переводе с древнегреческого означает *обзорный*), отделившись от динамической метеорологии, стала самостоятельным направлением. В свою очередь, спутниковая синоптическая метеорология сформировалась как самостоятельное направление синоптической метеорологии. Ее становление и развитие тесно связаны с развитием технических средств наблюдения с помощью космических средств дистанционного зондирования.

Исследованию процесса становления синоптической метеорологии уделяли внимание многие авторы. Следует отметить работы отечественных ученых Л.Н. Таборовского, С.П. Хромова, А.С. Зверева, В.И. Воробьева, Х.П. Погосяна, А.И. Угрюмова, А.Х. Хргиана, а также работы зарубежных авторов Э. Пальмена, Ч. Ньютона, С. Петерсена. В последнее время вышел ряд обзоров развития синоптической метеорологии за последние 100 лет.

Спутниковая синоптическая метеорология на современном этапе ее развития является, главным образом, наукой описательной. В основе ее лежит прочный физический фундамент, а прогресс ее развития обусловлен постепенным внедрением элементов гидротермодинамики и численных методов. Однако основные проблемы цикло- и антициклогенеза по-прежнему трактуются чисто качественно вследствие отсутствия их количественной теории.

Анализ истории становления и развития синоптической метеорологии, в том числе спутниковой, подтверждает следующую закономерность: применение новых технических средств наблюдения природных явлений позволяет через известное свойство атмосферы познавать протекающие в ней процессы и по-новому рассматривать уже известные факты.

Создание в середине XIX века регулярной сети метеорологических наблюдений позволило начать систематическое получение и обмен измерительной информацией о состоянии атмосферы. В 1820 г. Брандес ввел в метеорологию синоптический метод. Это событие дало начало накоплению количественных сведений об атмосферных процессах и свело проблему колебаний давления в основном к исследованию причин возникновения циклонов и антициклонов.

В период с 1916 по 1930 г. предпринимались отдельные попытки использовать теорию вращающейся жидкости для объяснения вопросов циклогенеза и движения циклонов. Главной трудностью в этом направлении оказалась невозможность объяснить уменьшение давления в центре циклона.

Параллельно с теоретическими работами, выполненными в начале двадцатого века, на основе теории полярного фронта была разработана современная концепция циклогенеза и фронтогенеза. Наибольшие успехи были достигнуты в результате эмпирических исследований ученых норвежской школы, в то время как их теоретические исследования не привели к созданию законченной теории циклогенеза.

В 1895 г. Вильгельм Бьеркнес и возглавляемая им научная группа пришли к пониманию того, что атмосферные движения могут быть описаны математически с помощью уравнений гидро- и термодинамики, а прогноз погоды должен рассматриваться как задача математической физики с начальными условиями, решаемая путем интегрирования системы исходных уравнений по времени, стартующих от начального состояния атмосферы. Сотрудниками группы была разработана теория генезиса фронтальных циклонов на полярном фронте. Эта научное направление стало в дальнейшем известно как бергенская, или норвежская метеорологическая школа.

Применение теоремы Бьеркнеса о циркуляции к полученным схемам фронтальных возмущений позволило лишь в самых общих чертах и только качественно наметить условия углубления молодого циклона как фронтальной волны. А в 1938 г. Т. Бергероном было установлено, что чисто кинематически падение давления при «завихревании» циклона происходит в результате совсем незначительной дивергенции воздушных масс в верхних слоях циклона и что ядро теплофронтальной области падения довольно хорошо совпадает с областью осадков, так как оба эти явления динамико-термодинамически объясняются вытеснением холодного воздуха и упорядоченным восхождением теплого воздуха.

Представители норвежской школы исходили из образования возмущения зонального западного потока бок о бок движущихся теплой и холодной воздушных масс. Из их описания следовало, что это возмущение является волной на поверхности раздела теплой и холодной воздушных масс. Возмущающей причиной служит язык холодного воздуха, *по какой-либо причине* внедряющийся в теплый поток. Оба эти возмущения должны одинаково

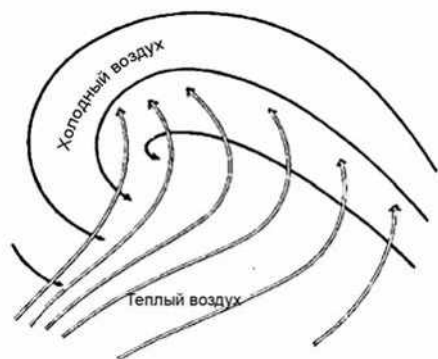


Рис. 1.1. Норвежская модель циклона как открытая волна с холодом и теплым фронтом.

сказаться на динамике движения, приводящей к циклогенезу, и вопрос может заключаться лишь в том, как на самом деле происходит возмущение зонального потока.

Норвежская модель циклона была сформулирована первоначально как статическая конструкция без рассмотрения жизненного цикла циклона: циклон как открытая волна с холодом и теплым фронтом (рис. 1.1).

Позже Туром Бергероном будет установлено, что область теплого сектора уменьшается со временем и что холодные и теплые фронты в конечном счете сливаются, образуя фронт окклюзии, что и поддерживает динамику циклона на протяжении его жизненного цикла.

Первоначально Бьеркнес и Солберг полагали, что «схлопывание» фронтов произойдет далеко от центра низкого давления и далее пойдет как застежка молнии, вытесняя теплый сектор от центра низкого давления. Забегая вперед, отметим, что на ИК снимках фронт окклюзии распознается по тепловому гребню, располагающемуся от пика теплого сектора по направлению к центру низкого давления.

В первой половине 30-х годов прошлого века получила развитие теория фронтологического анализа, при котором текущая погода рассматривается как функция расположения, свойств, перемещения и взаимодействия воздушных масс и фронтов. Открытие и изучение линий конвергенции в циклоне, на которых резко меняются свойства воздушных масс, является главным научным завоеванием норвежской метеорологической школы. Эти линии по аналогии с линиями на картах военных действий, памятных в послевоенные 1919—1921 годы, называли атмосферными фронтами.

Результатом совместной работы Бьеркнеса-младшего, Солберга и Бергерона стала концептуальная модель циклона и теория его развития в атмосфере, включая процесс окклюдирования.

Последующие исследования показали, что, кроме норвежской модели, были предложены иные интерпретации конфигураций циклонических фронтальных структур. В результате норвежская модель циклона подверглась критике и была пересмотрена. Были даже высказаны сомнения в полной адекватности объяснения этой моделью всего разнообразия фронтальных конфигураций и развития циклона умеренных широт.

30 января 1930 г. был впервые продемонстрирован первый метеорологический радиозонд П.А. Молчанова, и уже в мае того же года метеорологические радиозонды стали использоваться во Франции и Германии. Однако достаточно плотная мировая сеть аэрологических станций была создана только после окончания Второй мировой войны. Внедрение в оперативную практику данных аэрологического зондирования повысило оправдываемость прогнозов погоды к 1953 г. на 15 %.

Следующим событием, повлиявшим на развитие синоптической метеорологии, стало массовое использование в оперативной работе метеорологических радиолокаторов (МРЛ). Первые образцы сетевых МРЛ появились практически одновременно в СССР, США и Великобритании в конце сороковых годов прошлого века.

1 апреля 1960 г. на околоземную орбиту был выведен первый метеорологический искусственный спутник Земли (МИСЗ) TIROS-1 (Television and InfraRed Observation Satellite), предназначенный для наблюдения за облачностью и подстилающей поверхностью в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Уже первые изображения показали, что облачность, связанная с циклонами умеренных широт, развивается через последовательность опознаваемых циклов / каскадов как этапов жизненного цикла, которые практически согласуются с классической волновой норвежской моделью циклона умеренных широт.

Первые результаты работ по интерпретации изображений облачных полей циклонов и антициклонов, выполненные Р. Бушером и Р. Ньюкомбом, И. Лиизом, В. Видгером, К.Я. Кондратьевым, Е.П. Борисенковым, А.А. Морозкиным, Л.С. Мининой и другими исследователями, показали наличие корреляции особенностей полей облачности с различными стадиями развития циклона. Было отмечено, что, наряду с адвективными процессами, важное значение в формировании структур изображения облачных полей играют вертикальные движения в облачных образованиях. В качестве метода интерпретации изображений первоначально использовался нефанализ — построение схематических карт облачности.

Карта нефанализа (нефоскопического анализа) является расшифрованным, трансформированным снимком, все детали изображения которого с помощью условных обозначений перенесены с учетом масштаба на бланк географической карты (или непосредственно обозначены на фотоснимке или фотомонтаже, как показано на рис. 1.2).

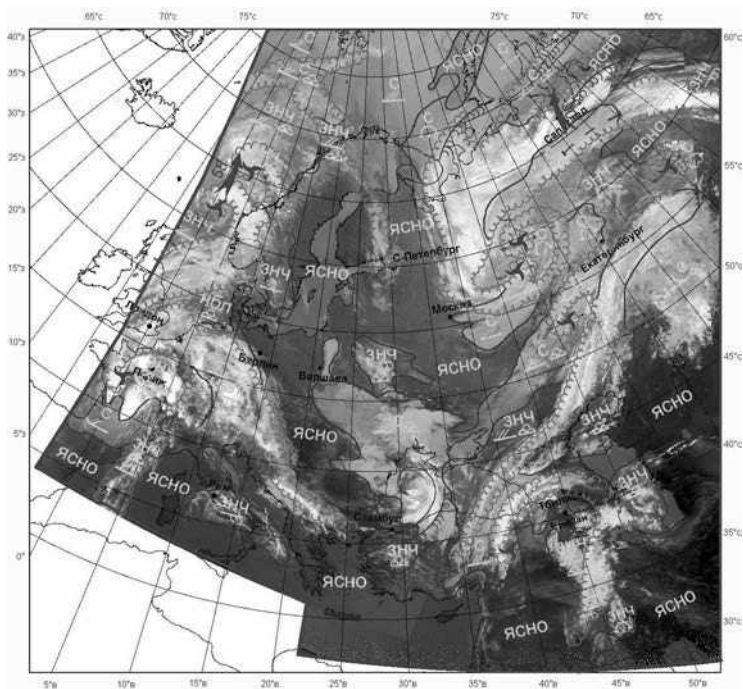


Рис. 1.2. Карта нефанализа, совмещенная с фотомонтажом.

К преимуществам карт нефанализа перед изображениями можно отнести тот факт, что он дает более обобщенное представление об облачности и содержит ее расшифровку. Карты нефанализа дают синоптику готовую схему, удобную для непосредственного и быстрого использования в оперативной работе.

На карте нефанализа (фотоснимке или фотомонтаже) обычно указывают следующие элементы:

- границы облачности, снега и льда,
- количество облаков для каждого выделенного облачного поля,
- тип облаков и данные о высоте их верхней границы,
- структуру облачных полей,
- размеры облаков и открытых пространств.

Следует отметить, что при замене фотографий картами нефанализа исчезают некоторые полезные характеристики облачности. Первоначально карты нефанализа применялись из-за несовершенства факсимильной аппаратуры для печати фотографий облачности, передаваемых по радиоканалам связи, которые часто имели такое низкое качество, что не представлялось возможным использовать их в оперативной работе. По мере расширения практики применения карты нефанализа превратились в самостоятельный продукт, позволяющий расширить границы анализа синоптических карт.

Особенно успешным для развития спутниковой синоптической метеорологии оказалось совместное изучение синоптических карт, съемки МРЛ и спутниковых данных.

С течением времени стали накапливаться вопросы, касающиеся неспособности господствующих в синоптической метеорологии концепций циклогенеза как волны на фронте интерпретировать получаемые изображения облачных полей. Данный конфликт разрастался в процессе совершенствования бортовой аппаратуры и использования изображений высокого разрешения, когда стали доступны для наблюдения структуры облачности мезо- и микромасштаба. Дело в том, что стали очевидными противоречия, лежащие в основе совместного анализа карт погоды и снимков полей облачности с ИСЗ. В основе данной проблемы лежит противоречие между хронокартографическим методом анализа карт барической топографии, основанным на изучении вертикального колебания атмосферы и горизонтального перемещения облачности как трассеров гидродинамических процессов в атмосфере.

Именно метеорологические ИСЗ позволили обнаружить недоступные ранее при анализе синоптических карт процессы и явления, вызванные влиянием тонкой структуры внетропических (среднеширотных) фронтальных циклонов, и дали возможность разработать соответствующие новые концептуальные модели. Более того, они позволили «увидеть» всю ситуацию синоптического масштаба, а не реконструировать ее на синоптических картах. Последнее стало возможным после запуска на высокоэллиптическую орбиту 28 февраля 2021 г. космического аппарата «Арктика-М», который дает возможность получить снимок всей Арктики.

За прошедшие с 1919 г. 100 лет исследования внетропических циклонов были в центре внимания международного научного метеорологического сообщества, так как они объединили усилия фундаментальных исследований в области физики атмосферы, динамической метеорологии, а затем и численного прогноза погоды. Почему воздушные массы сближаются и натекают одна на другую, почему поверхность раздела приходит в волновое движение, каковы критерии потери устойчивости волны, почему никакого внезапного появления циклона (которое наблюдалось бы при потере устойчивости) в природе не отмечается? Ответ на эти и другие вопросы при использовании волновой теории за прошедшие 100 лет так и не был получен. Ответа на них мы не имеем и по сей день.

Использование национальных спутниковых метеорологических систем началось в 1970-х годах. В настоящее время функционирует космическая составляющая Глобальной системы наблюдений Всемирной метеорологической организации (ВМО). Наблюдения из космоса осуществляются на базе геостационарных и полярно-орбитальных метеорологических спутников. Согласование международных вопросов в области применения космических

систем в прогнозировании погоды находится в ведении координационной группы по метеорологическим спутникам ВМО.

Отечественная метеорологическая космическая система «Метеор» входит как составная часть в глобальную космическую подсистему наблюдений гидрометеорологического назначения ВМО, которая сложилась на основе национальных космических систем при координирующей роли ВМО и является двухъярусной:

- спутники США, России, Европейского сообщества, Японии, Индии, КНР на геостационарной орбите (GOES-E, GOES-W, Meteosat, «Электро», MSG, MTSAT, INSAT, FY-2);

- система оперативных ИСЗ NOAA, «Метеор», EPS/MetOp на средневысотных приполярных солнечно-синхронных орбитах.

За прошедшие годы был достигнут значительный прогресс в разработке информационной аппаратуры метеоспутников. Вместо телевизионной аппаратуры первых космических аппаратов на метеоспутники стали устанавливать многоспектральные сканеры видимого и ИК диапазонов, например ИК и СВЧ зондировщики для определения вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы, обеспечивающие получение данных об облачном покрове, температуре подстилающей поверхности и других характеристиках:

- видимые, инфракрасные изображения и изображения в полосе поглощения водяного пара атмосферы используются для получения данных о векторах ветра, которые усваиваются моделями численного прогноза погоды (ЧПП);

- вертикальные профили температуры и влажности в атмосфере, получаемые по данным атмосферных ИК и СВЧ зондировщиков, усваиваются в схемах ЧПП;

- данные о ветре над поверхностью океана (скорость и направление приводного ветра) используются при решении таких задач метеорологии, как определение центра урагана и изучение процессов, связанных с межсезонными изменениями климата (типа явления Эль-Ниньо). С начала использования скаттерометрии значительный объем данных о параметрах ветра над океанами получается оперативно и также усваивается в моделях ЧПП.

Попытка создания концептуальной модели воздушных потоков внутри циркуляционных систем предпринималась в течении многих десятилетий. Основные принципы построения их траекторий были предложены еще в начале двадцатого века.

Известно, что норвежская концепция атмосферных фронтов имеет двойственный характер. С одной стороны, фронт может быть описан как наклонный тонкий слой перехода между двумя горизонтальными воздушными массами. Данная картина может быть дополнена путем включения струйного течения и тропопаузы. С другой стороны, фронт может быть охарактеризован также и другими признаками, например облачными си-

стемами и зонами осадков, которые должны образоваться из-за наличия упорядоченных восходящих движений по наклонной фронтальной поверхности. К середине пятидесятих годов прошлого века было обнаружено, что в циклоне (в пределах фронтальных зон) присутствуют и нисходящие движения влажного воздуха.

Применение изображений полей облачности внетропического / среднеширотного циклона, полученных с ИСЗ, показало, что их структура чаще всего не соответствует той структуре, которая должна формироваться при использовании норвежской концептуальной модели. Были обнаружены два типа довольно узких потоков, названных конвейерными лентами или несущими полосами, которые классифицированы по значению виртуальной температуры воздуха внутри них: теплая конвейерная лента (ТКЛ) и холодная конвейерная лента (ХКЛ).

ТКЛ называют протяженную массу относительно теплого воздуха, сформированную воздушным течением во внетропических циклонах. Она представляет собой поток воздуха, характеризующийся более высокими значениями температуры, влажности и импульса, который переносится в северном направлении и поднимается перед холодным фронтом. Гарольд впервые обратил внимание на узкий воздушный поток теплого воздуха в форме поднимающейся ленты и его ведущую роль в передаче в верхние слои атмосферы большого количества тепла и влаги. Велдоном была определена связанная с этим процессом область перистых облаков как область бароклинно-зональных перистых облаков.

Модель ТКЛ стала удобной концепцией для объяснения изображений на снимках фронтальных систем, полученных не только над территорией Северо-Западной Европы, для которой идея ТКЛ была сформулирована, но также и над территорией Соединенных Штатов Америки и Австралии.

С течением времени было экспериментально установлено, что воздух в ТКЛ движется на высоте вдоль холодного фронта, часть которого, как правило, располагается в форме низко расположенной струи в пределах пограничного слоя только перед поверхностным холодным фронтом.

В 1980 г. Карлсон на основе совместного анализа информации, полученной с помощью ИСЗ, МРЛ и изэнтропических карт, разработал трехмерную модель циклона как систему восходящих и нисходящих потоков в виде достаточно узких «конвейерных лент». Модель связала вертикальные воздушные движения, поле облачности и поле атмосферных осадков, что позволило понять механизм формирования канонического изображения облачности циклона в виде запятой на спутниковых снимках. Было установлено, что северная и восточная части изображения циклона развиваются по известной схеме ТКЛ, в то время как движущееся на запад расширение изображения запятой, которое является частью ее «головы», происходит к востоку от области низкого давления через ХКЛ.

В том же году в другой своей работе Карлсон изложил результаты исследований по анализу потока воздуха через развивающееся среднеширотное возмущение с целью изучения процесса развития облачного образования в форме запятой (комы). Представленная им модель включала оба типа конвейерных лент, что позволило исследовать относительную конфигурацию основных воздушных потоков и струйные течения. Эта модель также дала возможность связать вертикальные движения и поле осадков, формируемое вертикальным движением ТКЛ и ХКЛ. Фронтальные зоны в модели Карлсона понимаются как результат слияния воздушных потоков различного происхождения с различающимися свойствами (ТКЛ и ХКЛ). В нижней тропосфере холодный фронт представляется границей между ТКЛ и сухим воздушным нисходящим потоком к западу от ложбины. Теплый фронт представляется границей между ТКЛ и ХКЛ, распространяющейся с северо-востока и востока. Наличие и свойства высотной фронтальной зоны было изучено еще в конце шестидесятых годов. Развитие во времени поля облачности, наблюдаемое по снимкам, полученным с метеорологических ИСЗ, позволило проследить трансформацию формы поля облачности в главной структуре циклона — так называемой запятой. На рис. 1.3 приведено схематическое изображение развития поля облачности.

На ранней стадии развития циклона формируется область плотных облаков среднего и верхнего ярусов, содержащихся в пределах границы, показанной на рис. 1.3 кривой 1. Расплющенная область, выделенная штриховой кривой (2), соответствует движущейся в западном направлении расширяющейся области облачного покрова. Область, ограниченная пунктирной кривой (0), заполнена слоем тонких перистых облаков. Интрузия сухого воздуха изображена как узкий язык (3). Детально модель Т. Карлсона описана далее в соответствующем разделе.

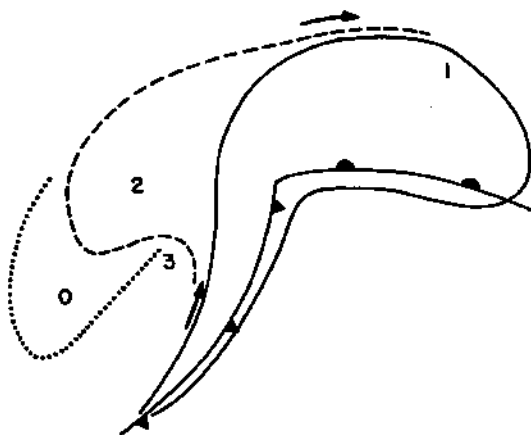


Рис. 1.3. Изображение «запятой» и этапы ее развития.

Условные обозначения см. текст.

Практически одновременно с Карлсоном Браунинг предложил свою концептуальную модель фронтального циклона, разработанную также с использованием понятия конвейерных лент, которая включает в себя, кроме ТКЛ и ХКЛ, также и так называемую мгновенную, или псевдоокклюзию, объяснить существование которой предыдущие модели не могли. Эта новая модель получила название «модели разделенного холодного фронта», в которой граница между холодным и теплым воздухом теплого сектора обозначается как высотный холодный фронт с дополнительным холодным фронтом, отстающим на малых высотах.

Мгновенная окклюзия — название условное. Более подходящее для нее название — псевдоокклюзия, поскольку ее механизм не производит классическую по сути окклюзию, но схожую по изображению облачных полей. Это название дано облачному образованию, имеющему форму буквы лямбда (λ), когда облачная полоса, связанная с полярной ложбиной, взаимодействует с облачной полосой, связанной с полярным фронтом (рис. 1.4).

Механизм формирования мгновенной окклюзии объяснили в 1990 г. Шапиро и Кейзер.

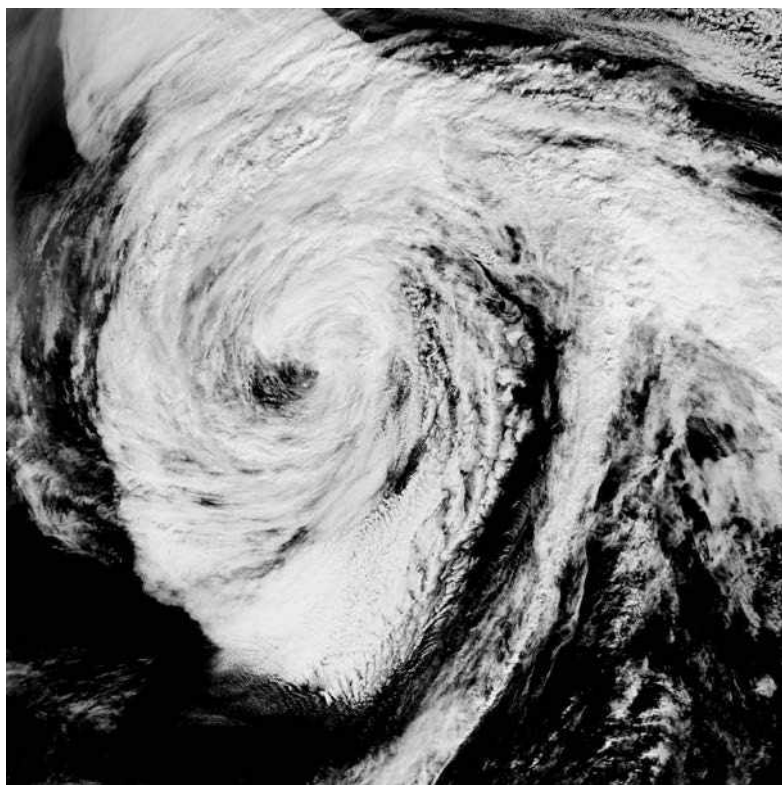


Рис. 1.4. Изображение «мгновенной окклюзии».

Для усвоения данных наблюдений в схемах численного моделирования реальных циклонов с помощью идеализированных моделей неустойчивых бароклинных волн Шапиро и Кейзер в 1990 г. предложили новую концептуальную модель жизненного цикла атмосферного циклона, которая носит их имя.

В отличие от норвежской модели, где холодный фронт «набегает» на теплый, холодный фронт в циклоне Шапиро — Кейзера перемещается почти перпендикулярно теплому фронту (фронтальная Т-структура) и перелом проявляется в величине горизонтального градиента температуры вдоль линии части холодного фронта, от центра низкого давления к полюсу. Фронтальный перелом описывается как область фронтолиза, которую авторы связали с низкотропосферной зоной пониженного давления. Было показано, что, хотя понижение давления, приводящее к фронтолизу в этой области, может быть совместимым с формированием излома, изэнтропическое вращение может привести к перелому в отсутствие вертикального движения.

Некоторые циклоны, обладающие характеристиками циклонов Шапиро — Кейзера (то есть фронтальным переломом, обратным фронтальным изгибом и фронтальной Т-структурой), на раннем этапе своего жизненного цикла могут развить окклюзию, подобную норвежской, формируемую на позднем этапе жизненного цикла циклона.

Модель атмосферного циклона Шапиро и Кейзера, основанная на анализе движения конвейерных лент, наиболее адекватно описывает тонкую структуру циклона и эволюцию поля облачности, наблюдаемую по спутниковому изображению, но не вскрывает природы формирования самих конвейерных лент. Более того, она не дает возможности анализа и прогноза развития антициклона как циркуляционного атмосферного образования. Для прогноза тенденции направления развития ССМ можно применить метод идеального конкретного результата (ИКР), суть которого заключается в том, что определяются объекты и/или действия, которые сами (за счет собственных ресурсов) выполняют нужное действие. В нашем случае ИКР — это механизм, показывающий, что, во-первых, циклон и антициклон как циркуляционные образования формируются одновременно и связаны единым процессом и, во-вторых, что при этом в циклоне также одновременно формируются холодный и теплый атмосферные фронты. Иными словами, в атмосфере возможен единый процесс циклофронтогенеза.

Единственный известный на данный момент времени механизм, который может быть использован для объяснения одновременного возникновения циклонической и антициклонической циркуляции в потоке жидкости, — это явление образования так называемых грибовидных течений (*mushroom currents*) в океане, открытое и изученное в восьмидесятые годы К.Н. Федоровым. Такие вихревые диполи являются квазисимметричными структурами, сочетающими узкий поток с парой вихрей противоположного знака на переднем конце потока, которые возникают при локальном кратковременном приложении импульса к поверхности или приповерхностному слою воды.

Тем не менее на сегодняшний день объяснить формирование грибовидного течения с помощью математической модели в условиях однородной и даже стратифицированной жидкости, учитывая все внутренние механизмы этой динамической структуры, в полной мере не удалось.

Анализ космических изображений показал, что форма атмосферного «гриба» может быть различной — как почти симметричной, так и существенно искаженной, вплоть до сохранения одной части грибовидной структуры. Эволюция импульсного струйного течения не является единственной ситуацией, в которой образуются или принципиально могут существовать вихревые пары циклон — антициклон. Циркуляционный диполь (ЦД) может быть образован и в процессе эволюции струйного потока. Подробное описание будет дано в следующей главе.

Одним из недостатков концепции Шапиро — Кейзера является отсутствие описания (или гипотезы) формирования ХКЛ и ТКЛ в атмосферном циклоне.

1.2. ПАРАДИГМА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АТМОСФЕРНОГО ЦИКЛОНА

Подход к решению задач в метеорологии основан на общем принципе — решении задач в контексте задач более высокого уровня и принципе достаточного основания.

Методы исследования в науках о Земле основаны на теориях, использующих наблюдения, а также моделировании реальных природных процессов, связанных с теоретическими идеализациями. Поэтому парадигма развития в метеорологии, основанная на оптимальных методах научного исследования, формирует научную основу для поисков дальнейшего понимания жизненных циклов природных образований, в том числе внетропических / среднеширотных атмосферных циклонов.

Уже в наше время Брайн Хоскинс обобщил физическое представление и концептуальное моделирование Солберга, Бьеркнеса, Бержерона и в 1983 г. описал «оптимальную» ситуацию, в которой динамические модели различной сложности взаимодействуют друг с другом и с данными наблюдений при формулировании концепций развития широкого спектра атмосферных процессов и явлений.

Похожий по смыслу тезис был в свое время озвучен М.В. Ломоносовым в следующем виде: «...из наблюдений устанавливать теорию, через теорию исправлять наблюдения есть лучший всех способ к отысканию правды или... не такой требуется математик, который только в трудных выкладках искусен, но который в изобретениях и доказательствах, привыкнув к математической строгости, в натуре сокровенную правду точным и непоползновенным порядком вывести умеет».

Синтез парадигмы о фронтальных атмосферных циклонах Солберга, Бьеркнеса, Бержерона, где теория, наблюдение и диагностика представляют собой некий синтез, применяемый для достижения физического понимания и его выражения через концептуальные модели, показан на рис. 1.5.

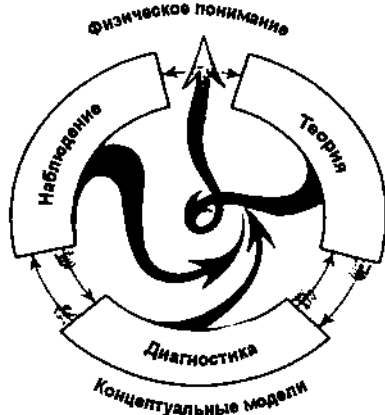


Рис. 1.5. Физическое представление в концептуальном моделировании.

Уточним элементы концептуального моделирования для синоптической метеорологии.

Теория основана на уравнениях движения атмосферы и иерархии выбранных приближений, которые выявляют доминирующие процессы, управляющие заданными масштабами атмосферного движения. Теории реализуются через динамические модели с использованием аналитических, численных и лабораторных методов решения.

Наблюдение составляет самый разнообразный элемент парадигмы. Метеорологические наблюдения неоднородны в пространстве и/или во времени. Инструментальные наблюдения с борта искусственных спутников Земли (ИСЗ) с высоким пространственным и временным разрешением включают перемещение (дрейф) облаков, данные о ветре. Полевые экспедиционные работы обеспечивают калибровку и валидацию новых технологий, предоставляют данные наблюдений, с помощью которых можно оценить репрезентативность смоделированных явлений, и являются основой для улучшения многих аспектов численного прогноза погоды (например, методы усвоения данных и параметризации физических процессов). Полевые экспедиционные наблюдения довольно часто приводят к открытиям новых погодных явлений и установлению их жизненных циклов.

Диагностика — это язык научного общения, производный от иерархии теорий и выполняемый на основе наблюдений и решений на основе моделей. Диагностика использует аналитические или численные методы для оценки и приписывания потоков аномалиям потенциальной завихренности (PV). Диагностика по методу Лагранжа включает расчеты траектории для описания переноса веществ, аэрозолей и водяного пара, а также образования облаков за счет содержащейся в воздухе влаги. Манипуляции с примитивными уравнениями движения дают уравнения Эйлера для оценки

мгновенных лагранжевых тенденций, например фронтогенеза и изменения потенциальной завихренности, а также дисперсии кинетической энергии.

Концептуальные модели выражают физическое понимание, идеализированные наброски явлений и управляющих ими динамических процессов и являются кульминацией научных методов исследования.

Примеры концептуальных моделей в метеорологии, которые объединяют элементы теории, наблюдений и диагностики при их формулировании и/или применении, включают:

- норвежскую модель жизненного цикла внетропических циклонов;
- незавершенные модели жизненного цикла внетропических циклонов Карлсона и Браунинга;
- модель циклогенеза Шапиро — Кайзера;
- модель циркуляционного диполя.

Влияние процессов планетарного масштаба на жизненные циклы внетропических циклонов

Одной из основных проблем на пути к физическому пониманию и уточнению концептуальных моделей фронтальных циклонов была теоретическая интерпретация разнообразия путей эволюции циклонов, наблюдаемых на синоптических картах, спутниковых изображениях поля облачности, в оперативных численных прогнозах погоды, смоделированных на основе идеализированной атмосферы. Современные исследования развития атмосферных циклонов обращаются к следующим процессам синоптического и мезомасштаба:

- фронтогенезу,
- вторичной циркуляции,
- воздушным потокам,
- трению.

К ним можно добавить общее рассмотрение среды планетарного / синоптического масштаба, в которой развиваются циклоны, фронты, струйные течения и тропопауза.

1.3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ АТМОСФЕРЫ

1.3.1. ПОНЯТИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Понятие предметной области впервые было введено в начале восьмидесятых годов прошлого века П. Ченом при конструировании семантических моделей средствами естественного языка.

Определения предметной области были также даны в работах В.Е. Туманова и А.С. Устенко. Первый автор определяет ее как целенаправленную первичную трансформацию картины внешнего мира в некоторую умозрительную картину, определенная часть которой фиксируется в качестве модели фрагмента действительности. Второй автор дает практически идентичное

по смыслу, но отличное по выражению определение предметной области, а именно как мысленно ограниченной области реальной действительности или области идеальных представлений, подлежащей описанию (моделированию) и исследованию.

Другое используемое определения предметной области отражает примерно ту же ее внутреннюю конструкцию, а именно как бесконечную часть реального мира, содержащую как существенные, так и незначимые с точки зрения проводимого исследования данные.

Со временем стало очевидным, что область применения данного понятия может быть гораздо шире и распространяется не только на сферу IT-технологий, но и на любую профессиональную сферу деятельности, в том числе экономику, юриспруденцию, инженерную и инновационную деятельность.

В состав предметной области обычно включаются объекты, отличные друг от друга по каким-либо *признакам* или *свойствам* или находящиеся в *определенных отношениях между собой*, или *взаимодействующих между собой* каким-либо *функциональным образом*.

В контексте этого *функциональные отношения* представляют собой однозначное отображение множества X значений показателя некоторого свойства во множество Y значений показателя того же или иного свойства.

Взаимодействие объектов определяется по результатам изменения значений показателей наблюдаемых свойств этих объектов, для чего после каждого действия или взаимодействия объектов фиксируется определенный результат — либо значение, либо определенная комбинация значений, показателей свойств взаимодействующих объектов. Предметные области отличаются друг от друга как нечто целое, реально существующее или возникающее в нашем сознании и обладающее свойствами, значения которых позволяют нам однозначно распознавать это нечто (объекты). Объект, на котором сосредоточивается внимание субъекта с целью исследования, принято считать *объектом исследования*. Взаимодействие объектов между собой осуществляется через их свойства с порождением взаимосвязи, выражающей взаимоотношения между объектами. Такое абстрагирование формирует понятие «сущности», которое является результатом абстрагирования реального объекта.

Предметная область обладает свойством дискретности и различимости и делится на материальные и нематериальные объекты, имеющие вещественное воплощение в реальном мире и не имеющие такового (например, имена, понятия, ситуации) (рис.1.6). На рис. 1.6 представлен один из вариантов классификации ситуаций в рамках предметной области. Сущность предметной области может классифицироваться как материализуемые, так и не материализуемые сущности, а ситуация предметной области наук об атмосфере в общем и в синоптической метеорологии, в частности, в соответствии с классификацией *процессы* и *события* характеризуется как *динамическая ситуация* (рис. 1.7).

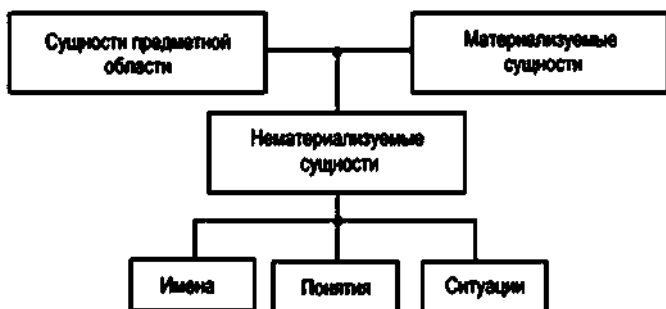


Рис. 1.6. Классификации объектов предметной области.

В данной классификации предметной области время выступает и как конкретный момент наступления события, и как интервал, характеризующий длительность события.

Это означает, что реальное время физического мира и его отражение в источниках информации различно.

При данных условиях состояние предметной области в каждый конкретный момент времени будет характеризоваться выделенной совокупностью объектов и ситуаций. Таким образом, ее описание представляется спецификацией, состоящей из системы понятий и определений понятий, описания предмета и методов исследования и априорного знания об объектах и методах исследования.

В общем случае спецификация является количественно-качественным описанием свойств, поддающихся формализации (кодированию в кодах математических, лингвистических, физических, химических и т.п.). Чем больше свойств специфицировано, тем адекватнее модель объекта.



Рис. 1.7. Классификация ситуаций предметной области.

В идеале возможна спецификация всех без исключения свойств. Тогда соответствующая модель полностью адекватна объекту. Такая модель и есть полная внутренняя информация объекта, но сам объект ее «не знает».

Ее может знать (и то лишь частично) субъект, если он умеет извлекать внутреннюю информацию из объекта, т. е. реализовывать информационный процесс, в котором внутренняя информация тиражируется и воспроизводится через кодовые преобразования. Назначение информационного поля — хранить внутреннюю информацию, а передача внешней информации осуществляется силовыми физическими полями.

Спецификация предметной области включает следующие элементы:

1) систему понятий, которая содержит систему взаимосвязанных понятий, определяющих предмет рассмотрения и цели исследования и то, что именно интересует нас в объектах предметной области, а также потенциально бесконечное множество признаков, величин (оснований), характеризующих объекты;

2) систему законов предметной области: аналитические выражения, фиксирующие связь понятий (например, физические законы, устанавливающие взаимосвязь величин), а также множество индуктивных законов (закономерностей), устанавливающих взаимосвязи между потенциально бесконечным множеством признаков, характеристик (оснований) объектов предметной области.

Объекты предметной области являются целостными образованиями, соединяющими в себе понятия из системы понятий и законы из системы законов предметной области. Поэтому законы из системы законов выполняются (с некоторой степенью вероятности, достоверности и т. д.) на объектах предметной области. Если на систему законов смотреть как на систему аксиом, сформулированную в системе понятий предметной области, которой должны удовлетворять ее объекты, то они являются объектами-моделями системы аксиом предметной области. Совокупность всех таких объектов-моделей системы аксиом предметной области дает картину всех возможных объектов в данной системе понятий и позволяет спрогнозировать существование новых объектов, удовлетворяющих системе аксиом предметной области.

1.3.2. КОНТИНУУМ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Количество научных фактов, привлекаемых для формулирования и выдвижения гипотезы, а также для ее проверки, бесконечно. Для уменьшения размерности параметров анализируемых объектов атмосферы и подстилающей поверхности необходимо использовать обобщенные показатели, выраженные в универсальных понятиях фундаментальной науки. Для целей изучения спутниковой синоптической метеорологии предлагается использовать понятие *континуума предметной области*, которое отражает механизм реализации пространственно-временного континуума.

1.3.3. ПОНЯТИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КONTИНУУМА

Концепция континуума как непрерывного протяженного образования, составленного из дискретных объектов, первоначально была введена в оборот в физике. Необходимость оперировать упорядоченным множеством связанных объектов, их состояниями и целостностью, на фоне которого они существуют, была вызвана изучением объектов, невидимых невооруженным глазом или наблюдательными инструментами.

Изначально континуум рассматривался исключительно с математической и физической точки зрения.

В математике понятие континуума употребляется для обозначения образований, обладающих известными свойствами непрерывности, таких как системы действительных чисел (так называемый числовой континуум). В *топологии* свойства непрерывности пространства характеризуются понятием связности множества (или всего пространства), которое определяется следующим образом: множество M называется связным, если при любом разбиении его на два непересекающихся непустых подмножества A и B найдется хотя бы одна точка, принадлежащая одному из них и предельная для другого.

В рамках естественно-научных теорий понятия пространства и времени, как правило, не определяются. Они вводятся либо с помощью абстрактных математических структур, либо посредством соответствующих операциональных определений протяженности и длительности. Для понимания роли и места понятий пространства и времени внутри теорий необходимо выйти за пределы данной теории и обратиться к содержательному рассмотрению самих этих категорий.

При рассмотрении пространственно-временного континуума считается, что *время* — это обобщенный показатель качественных изменений; относительное положение во времени характеризует определенное качественное состояние объекта. Для определения расположения в пространстве используется трехмерное пространство, свойства которого позволяют существовать материи. Можно допустить существование пространства — времени с иным числом пространственных измерений, но это уже будет совершенно иной, не представимый в наших понятиях мир.

В классической механике Ньютона пространство вводится посредством евклидовой трехмерной геометрии. В силу этого оно непрерывно, упорядочено, трехмерно, бесконечно, безгранично — это трехмерный континуум точек.

Понятия пространства и времени используются в паре друг с другом. Это связано с тем, что и тот, и другой термин выражает упорядоченность, встречающуюся в мире. Взаимодействия на материальном уровне происходят в результате обмена импульсом (квантом или порцией энергии). Взаимодействие на уровне поля происходит в результате обмена потенциалом, т. е. возникает предпосылка к передаче импульса на материальном уровне.

Научное представление о времени предполагает его унификацию для всех дисциплин. Однако в каждой из них складывается своя *шкала времени, кратная определенному кванту действия*, принятому в данной научной дисциплине. С течением времени стало очевидным, что практически любые объекты или группы взаимосвязанных объектов (а точнее, преобразующие их процессы) допускают представление о собственном, частном времени.

Метеорология как одна из наук о Земле оперирует с широким диапазоном пространственных размеров (от микрометров до тысяч километров) и временной длительности природных процессов (от микросекунд — прохождение электрических разрядов в атмосфере, до миллиардов лет — астро-геологическая история Земли). Изучение этого разнообразия привело к поиску единиц «деления», позволяющих сравнивать между собой развертывание во времени различных явлений.

Известна также попытка построения объединенной теории пространства — времени и физических взаимодействий, опирающейся на понятие отношений между событиями. Математическую основу такого подхода составляет теория бинарных систем комплексных отношений (обобщение бинарных физических структур). Для объяснения понимания времени в разных отраслях знания Роберто ди Бартини была разработана концепция трехмерного времени.

1.3.4. СВОЙСТВА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОНТИНУУМА

Одним из основных свойств континуума является его несчетность, что предполагает практически бесконечное его деление на определенные классы. Для атмосферных объектов одним из оснований деления на классы служит взаимодействие объектов. В природе такое взаимодействие всегда связано с обменом энергией, веществом или информацией. Обмен происходит на следующих уровнях:

- уровне физической материи,
- уровне поля,
- информационном (непараметрическом) уровне.

Как было указано ранее, невозможно проводить исследование без наблюдаемых и измеряемых (в том числе в эксперименте) физических величин и свойства континуума. Принцип наблюдаемости является одним из регуляторов развития науки. Для правильного понимания природы объективно-реальных, функциональных пространства и времени необходимо помнить, что они образуются не конкретным видом движения, а комбинацией движения и изменений.

Также не вызывает возражений тезис о том, что зачастую один и тот же момент можно трактовать и как *событие*, и как *элемент* в формировании определенной структуры. Здесь следует отметить, что не только материю и движение, но и пространство (и время) можно познать лишь путем изучения конкретных материальных вещей, явлений и процессов в их взаимодей-

ствии и развитии. В связи с этим можно согласиться с Ю.Б. Молчановым, который констатировал, что пространство и время не существуют сами по себе и поэтому содержание этих понятий нужно исследовать не вообще, а только изучая *конкретные явления природы и их взаимосвязь между собой*.

Задание элементов и отношений между ними еще не составляет теории. Для того чтобы некоторое утверждение стало теорией, необходимо ввести определенные закономерности, задать свойства отношений, которые сделали бы математическую конструкцию содержательной. Тожество никогда не отражает функциональной зависимости. Ее характеризует математическая зависимость в виде уравнения, а простейшим случаем закономерности являются числовые отношения между элементами, которые удовлетворяют неким алгебраическим соотношениям.

Пространство и время связаны с процессом становления объекта, поскольку материальные вещи и их состояния при своем возникновении образуют свои собственные пространство и время. По мнению В.И. Свидерского, пространство в отличие от времени, связанного с изменением, связано с сосуществованием. В то же время было замечено, что объективно-реальное функциональное пространство связано не столько с сосуществованием, «рядоположенностью» вещей и явлений, сколько с изменением, благодаря которому возникают и существуют материальные объекты, процессы до своего исчезновения как таковые. Далее Свидерский писал о том, что если бы свойства пространства и времени были иными, не мог бы существовать наблюдаемый физический мир. Так, только в пространстве, имеющем три измерения, возможно существование устойчивых механических объектов. Если бы размерность была бы иной, то физические условия резко отличались бы от условий, существующих в наблюдаемой нами Вселенной. Однородность и изотропность пространства, а также однородность времени приводят к законам сохранения импульса, момента импульса и энергии, без которых наш мир тоже был бы иным.

Исследование процессов в различных направлениях науки позволяет обнаруживать пространственные закономерности. Данный факт связан с тем, что каждый материальный объект образует свое собственное пространство (точнее, свой собственный пространственный объем).

1.3.5. КОНТИНУУМ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ МЕТЕОРОЛОГИИ)

Описать все связи между всеми элементами природной среды невозможно. Однако можно выделить и исследовать общие элементы поведения объектов в какой-либо предметной области. Используя закономерности, присущие такой области и отображаемые, как правило, непараметрически, мы можем получить инструмент решения теоретических и практических задач.

Метеорология в частности, и науки о Земле в общем имеют дело со значительным разнообразием процессов, распределенных по сильно растянутой шкале временных характеристик. Они оперируют процессами, ха-

ракетное время существования которых намного превышает возможности прямого наблюдения. В качестве обычного приема, позволяющего получить представление о продолжительных явлениях, применяется замена цепочек событий, развернутых во времени, пространственными рядами. Практически любой природный процесс можно охарактеризовать специфическим характерным временем или комплексом характерных времен. Понятие «характерное время» может дать представление об относительной скорости протекания изучаемых процессов или продолжительности жизненного цикла. Чем больше характерное время, тем меньше скорость процессов. Выбор единицы времени в большой степени зависит от характера изменений.

Является общепризнанным факт, что элементы теории не могут быть однозначно выведены ни из какой совокупности экспериментальных данных и что в изучаемых элементах всегда содержится некоторая информация о материальной действительности, которой нет в экспериментальных данных. Эта информация порой является весьма существенной. Так, например, создание Эйнштейном, Бором, Дираком своих теоретических моделей материальной действительности, по общему признанию, было революционным преобразованием уровня наших знаний о физических формах движения материи, хотя в некоторых принципах этих теорий содержалась информация о материальной действительности, не вытекающая из имевшихся экспериментальных данных.

Основными контентами, описывающими поведение природных объектов, можно считать происходящие физические процессы, свойства среды, в которой они происходят, и наблюдаемые вследствие этого явления.

Понятие процесса можно вывести из проявления устойчивой связи — закономерностей существования объектов в природной среде, но только с некоторым приближением. Это связано с тем, что не всегда можно дать ответ на вопрос: «Что познается — новые объекты действительности или знания об этих объектах?».

В качестве методологического приема формализованного описания научного знания о природной среде можно взять достаточно полно разработанный в 40—90-х годах XX века в СССР и международном научном сообществе институт доказывания научных открытий. Он заключается в поисках связи наблюдаемых явлений, свойств среды и закономерностей наблюдения явлений. Метод позволяет выявить, установить и формально описать объективно существующие закономерности, свойства и явления материального мира.

Научное определение, отражающее строение материального мира, его качественную, сущностную сторону, формирует свой *континуум*: ПРОЦЕСС → СВОЙСТВО → ЯВЛЕНИЕ.

Закон природы (реализуется в процессе) — необходимое, существенное, устойчивое, повторяющееся отношение между явлениями, которое выражает связь между предметами (основными элементами данного предмета) и между свойствами вещей.

В каждой области знания существует своя закономерная связь между объектами в данной предметной области. Поэтому соответствующий природный закон отражает именно эту специфику, что необходимо для решения соответствующих практических задач. Но вместе с тем необходимо учитывать и характерные особенности исследований, исторически сложившиеся в каждой конкретной области знаний.

При изучении атмосферы для получения связей о ее состоянии применяются наблюдение, измерение и эксперимент.

Наблюдением называется фиксация и регистрация каких-либо характеристик объекта, находящегося в естественном состоянии или в условиях научного эксперимента. Важной особенностью этого способа является использование регистрирующей аппаратуры, поскольку при наблюдении объекта, находящегося в естественном состоянии, не нарушается его связь с другими объектами.

Измерением называется фиксация и регистрация количественных характеристик исследуемого объекта. Используя полученные количественные данные, можно выявить качественную сторону объекта, способную составить новое существенное знание.

Эксперимент связан с исследованием объекта, находящегося в специально созданных условиях. Эксперимент позволяет выявить свойства объекта, а также получить их количественную их оценку.

Как было указано ранее, в правовой классификации, в отличие от научной, *закономерность* занимает самый низкий уровень. Она определяется как «объективно существующая устойчивая связь между явлениями и свойствами материального мира». Этим устанавливается производность (с правовой точки зрения) закономерности от явлений и свойств, поскольку для установления связи между явлениями и свойствами они должны быть сначала обнаружены.

В науке, как было отмечено выше, несколько иная иерархия. Там устойчивая закономерность (протекающий процесс) имеет наивысший статус.

Свойство материального мира — это объективно существующая качественная сторона объекта материального мира или качественная форма конкретной сущности объекта материального мира.

Явление материального мира — это объективно существующая форма проявления сущности объекта материального мира (природы) и неделимая частица познания, в том числе в исходной, промежуточной или конечной фазе природного процесса.

Известно также, что одна и та же сущность может иметь множество различных проявлений, откуда следует, что всякое сложное физическое явление может быть формой выражения нескольких сущностей, относящихся к различным структурным уровням материи. Поэтому материальный мир, толкуемый как вещественный, физический, реальный, может быть подразделен на *материальный мир природы* и *материальный мир техники* — «второй природы», создаваемый руками людей.

Свойства бывают общими и специфическими, существенными и несущественными, внешними и внутренними, необходимыми и случайными. Каждое свойство представляет собой определенную характеристику объекта.

Закономерность — это, прежде всего, устойчивая (позволяющая моделировать) связь между наблюдаемыми явлениями и свойствами материального мира, отвечающая требованиям существенности, устойчивости, объективного существования и коренных изменений.

Рассмотрим более подробно, что же представляет собой понятие «связь», которым определена закономерность.

Связь — понятие, выражающее тот факт, что одно явление существует (или развивается) в определенной зависимости или подчиненности от другого явления. Эта зависимость может быть либо односторонней, либо взаимной. Отметим, что данное определение связи вполне справедливо и относительно категории свойства. Всякая связь предполагает также определенные отношения, т. е. определенное пространственно-временное расположение между связываемыми объектами.

Принципиальное различие между *связями* и *отношениями* заключается в том, что *связь* предполагает *определенное энергетическое взаимодействие или воздействие* в отличие от *отношения*, *не имеющего такой энергетической характеристики*. Кроме того, связь обеспечивает целостность природной системы элементов и компонентов. Отношения не характеризуют целостности системы и могут выражать как соотношение элементов и компонентов внутри данной системы, так и соотношение между элементами и компонентами разных систем.

Связи существуют объективно. Они не конструируются человеческим сознанием. Отношения же могут быть и искусственными (логическими) конструкциями. Так, например, гравитационная связь принадлежит к природной связи и является объективной, в то время как графические или иные знаковые связи сами по себе объективно не существуют, а выступают как идеальное выражение объективно существующих материально-вещественных связей и отношений в природе.

Связь, выражающая закономерность, должна быть устойчивой, необходимой (не случайной) и носить общий характер.

Рассмотрим теперь определение свойства, которое выявляется во взаимоотношении данного объекта с другими объектами. Явление и свойство качественно несводимы одно к другому и вместе с тем неразрывно взаимосвязаны.

Системные свойства присущи также явлениям, свойствам и закономерностям, обнаруживаемым в искусственных (технических) системах. *Природа позволяет создавать искусственно только такие объекты, которые не выходят за рамки ее законов — открытых или же пока неизвестных.*

Если рассмотреть понятие «длительность» для метеорологических объектов в пространственно-временном континууме, то можно предположить,

что оно связано с еще одним понятием — «жизненный цикл». Пространственно-временная континуальность атмосферы не может характеризовать изучаемые процессы, свойства и явления в метеорологии как научной дисциплине. Поэтому необходим переход к континуальности предметной области, где континуум метеорологии может быть выражен соотношением ПРОЦЕСС $\rightarrow$ СВОЙСТВО $\rightarrow$ ЯВЛЕНИЕ, как условием существования в реальном физическом мире на языке предметной области.

К настоящему времени не существует общепринятой точки зрения на то, каковы границы горизонтальных масштабов микрометеорологических, мезометеорологических и синоптических процессов. Разными авторами предложены различные классификации атмосферных процессов по пространственно-временным масштабам, и в каждой из них мезометеорологическим процессам отводится свой, отличный от других диапазон значений масштабов.

Определение границ размеров процессов, приведенное в табл. 1.1, основано на обработке данных наблюдений и поэтому является сугубо феноменологическим. Оно не раскрывает генетического различия процессов атмосферных движений разных масштабов.

Существует также динамический метод определения масштабов, основанный на анализе соотношений основных сил, действующих в атмосфере.

Применение такого метода дает следующие результаты:

- геострофический баланс с достаточной точностью может выполняться только для атмосферных движений, горизонтальный масштаб которых превышает 1000 км;

- для движений с горизонтальным масштабом менее 1000 км геострофический баланс существенно нарушается; иными словами, эти движения являются агеострофическими;

- атмосферные процессы можно считать гидростатическими, если их горизонтальный масштаб превышает 1 км;

- атмосферные движения с масштабами менее 1 км, традиционно относимые к турбулентности, являются агеострофическими и негидростатическими;

- процессы синоптического и глобального (планетарного) масштабов, горизонтальные размеры которых превышают 1000 км, являются геострофическими и гидростатическими;

- в промежуточном интервале масштабов 1—1000 км находятся гидростатические и агеострофические процессы.

Континуальность с точки зрения временной непрерывности и пространственной дискретности характеризует одновременность существования различных объектов (табл. 1.1).

Таким образом, естественно-научный континуум атмосферы как предметной области (и метеорологии как дисциплины) будет образовывать объекты во всем многообразии ее процессов, свойств и явлений. Их целостность

Соотношение между элементами континуума

Объект изучения	Объект описания
Процесс	Явлениями, формирующимися через свойства среды
Свойство	Процессами воздействия на среду и формируемыми явлениями
Явление	Действием процесса на среду с учетом ее свойств

имеет специфический предмет исследования — воздушную оболочку Земли и формы ее движения. Именно поэтому любые действия, осуществляемые с учетом состояния атмосферы, необходимо соотносить с ее пространственно-временным континуумом.

Основатели синоптической метеорологии также рассматривали вопрос, стоит ли в метеорологии работать с такими же познавательными-теоретическими принципами, как в физике, т. е. с одной чистой теорией? И дали на него отрицательный ответ, объясняя это следующим образом.

1. Дедукция в динамической метеорологии всегда должна исходить из очень упрощенных допущений, поэтому рассматриваемая проблема легко может развернуться на противоположной стороне неустойчивого положения. В результате получается фиктивное решение.

2. Индукция не может пользоваться безграничным числом случаев одного и того же явления с целесообразными «условиями эксперимента». Напротив, почти каждый новый случай частично представляет собой явление другого рода или, во всяком случае, условия в нем изменены нецелесообразно.

В связи с этим в целях плодотворности исследования необходимо предварительно ограничить «разделы», в которые можно было бы уложить разнообразие связанных между собой явлений. Затем надо применить по возможности исчерпывающие рабочие методы и эти «разделы» или методы использовать последовательно до конца.

Возникновение понятий в естественных науках подвержено отсутствующему в других областях произволу, который нельзя рассматривать как недостаток объективности или как необходимое для развития динамической метеорологии теоретико-познавательное основание.

Только при этих допущениях можно правильно оценить использованные шаблоны тропосферной структуры и порядок их величины. Как и вообще методы норвежской школы, образование понятий не должно представлять собой готовую систему, а только предоставить для этого соответствующий инструмент.

Первый принцип. В области метеорологического исследования ни чистая эмпирия, ни чистая теория не приводят к цели. Явления приходится брать такими, какие они есть в атмосфере; на них нельзя воздействовать, и только исключительно редко отдельные явления можно найти и изучить в чистом виде. Если бы мы попытались без эмпирических данных, т. е.

чисто теоретически, проникнуть в сущность метеорологических процессов, и особенно непериодических, отражающихся на синоптических картах, то этого нам не удалось бы добиться, так как теоретически возможных состояний слишком много. Практико-синоптическое исследование (эмпирия) должно, прежде всего, показать, какую *приблизительно* структуру может иметь атмосфера в различных ситуациях. Только после этого выступает теория и показывает, каким образом привести эти данные в соответствие с законами физики.

Чисто эмпирически достигнуть цели также невозможно. Располагая одними только эмпирическими данными, можно получить лишь бесконечный объем опыта, который без теории не может быть систематизирован.

Второй принцип. Необходимо иметь правильное представление о порядке встречающихся величин. Иначе можно переоценить или недооценить эффекты различных состояний или действующих факторов. В физических лабораториях это не так опасно: там можно сотни раз проверять эксперимент, чтобы выяснить наконец, действительно ли данный эффект имеет место. Но в метеорологии это невозможно.

Третий принцип. Физические уравнения должны быть приспособлены к атмосфере. При этом следует обратить внимание на следующие четыре обстоятельства.

1. Вертикальная стратификация атмосферных состояний и вертикальное направление атмосферных движений приблизительно в 1000 раз более выражены, чем горизонтальные. Причина этого заключается в том, что вертикальные градиенты давления и температуры приблизительно в 1000 раз больше горизонтальных.

2. Атмосферные процессы протекают в пределах по меньшей мере пяти ступеней порядка величины относительно однородного движения:

1) молекулярное движение (микро — микро);

2) ламинарное движение внутри каждого мельчайшего турбулентного элемента (микро);

3) упорядоченное течение внутри мельчайших циклов, как, например, в кучево-дождевых облаках или чисто в местных циклах морских и береговых бризов (макро);

4) движения, происходящие в пределах каждого ясно видимого возмущения в барическом поле, не считая кучевых, кучево-дождевых облаков и т. п. (макро — макро);

5) макрорасчлененные движения крупнейших членов циркуляции атмосферы.

Динамические и термодинамические уравнения в их первоначальной форме приложимы только внутри ламинарного потока.

3. Принцип геометрического подобия движений позволяет вывести заключения об аналогии между атмосферными движениями крупного масштаба и движениями жидкости в лабораторных условиях. Отсюда следует, что

воздух, занимающий более значительное пространство при уменьшенной скорости, ближе, чем в малых объемах, подобен несжимаемой жидкости. Из этого следует, что чем больше масштабы воздушных движений, тем более они приближаются к движениям несжимаемых жидкостей.

Течение воздуха по земной поверхности на больших пространствах по своему характеру гораздо ближе к течению воды.

4. Измеренные с поверхности Земли движения атмосферного воздуха не являются, однако, абсолютными движениями, а только движениями относительно вращающейся Земли. Воздух в движениях большого масштаба можно рассматривать как несжимаемую жидкость.

Четвертый принцип. Для изучения непериодических явлений в атмосфере неизбежно исследование отдельных конкретных случаев. Гораздо важнее изучать отдельные случаи и изучать именно синоптически, при этом учитывая все элементы и, где можно, не только в направлении x и y , но и в направлении z , т. е. вверх по вертикали с помощью аэрологических данных, короче говоря, трехмерно. Барометрическая формула, таким образом, показывает только, каким при заданном вертикальном распределении T или p должно быть давление в каждой точке по вертикали, чтобы не возникали вертикальные ускорения.

1.4. НАБЛЮДЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМ ИЗ КОСМОСА

Структура облачных систем связана с воздушными потоками, температурой и содержанием водяного пара в атмосфере, а также с вертикальной устойчивостью воздушных масс.

1.4.1. НАБЛЮДЕНИЕ ОБЛАКОВ ИЗ КОСМОСА

На изображениях различают четыре основные формы облаков: перистообразные, слоистообразные, кучевообразные, слоисто-кучевые.

На снимках, полученных в видимом диапазоне, перистые облака, как правило, имеют волокнистую структуру (рис. 1.8).

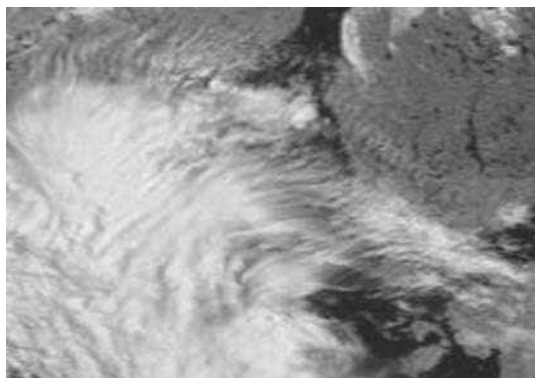


Рис. 1.8. Изображение перистообразных облаков.

Волокна и полосы перистообразных облаков ориентированы в направлении ветра на уровне облаков. Тонкие перистые и отдельные перисто-кучевые облака на изображениях не прослеживаются. Иногда перистые облака могут обнаруживаться по теням, которые они отбрасывают на подстилающую поверхность. Сквозь неплотный покров перистых облаков могут просвечивать как расположенные ниже облака, так и подстилающая поверхность (рис. 1.8). Исключение составляют лишь плотные перисто-слоистые облака. Они не имеют мезомасштабных особенностей, текстура их матовая, и поэтому их относят к слоистообразным.

На снимках слоистообразными выглядят следующие облака:

- перисто-слоистые облака (Cs),
- мощные высокослоистые (As),
- слоисто-дождевые (Ns),
- низкие слоистые облака (St),
- туман.

Характерными признаками слоистообразных облаков на изображении являются:

- 1) полное отсутствие каких-либо мезоструктурных особенностей;
- 2) сплошной однородный покров матовой текстуры;
- 3) яркий тон изображения — серо-белый или чисто-белый в зависимости от мощности облаков.

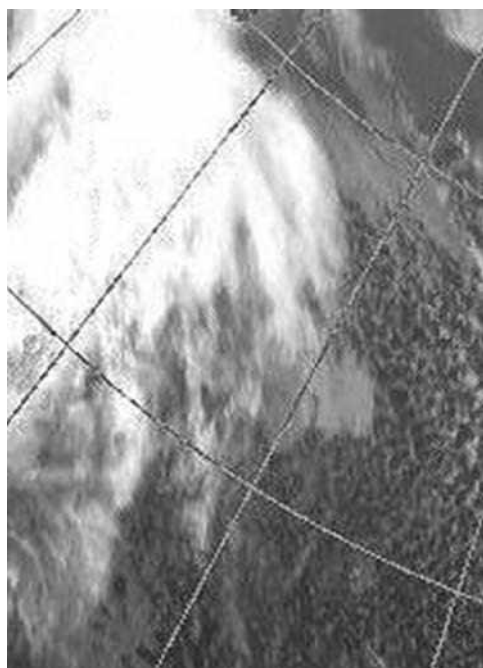


Рис. 1.9. Слоисто-дождевая облачность.

Обычно при наличии исключительно плотных перисто-слоистых облаков они имеют вид серо-белой пелены. Если же такие облака сопровождаются другими, более низкими облаками, то их изображение выглядит несколько ярче. Также в виде белой пелены на снимках прослеживается высокостлоистая облачность. Изображение слоисто-дождевых облаков или сочетание их с высокостлоистыми выглядит как ярко-белый однородный покров (рис. 1.9).

Низкие слоистые облака и туман имеют вид серо-белой пелены. Если при этом мощность их небольшая, то их очень трудно опознать на фоне подстилающей поверхности. Если же их мощность велика, то их трудно отделить от других слоистообразных облаков.

Кучевообразные облака (рис. 1.10) на изображении в видимом диапазоне выглядят как облака нижнего и среднего ярусов, если они имеют зернистую текстуру. Обычно это облака кучевых форм, но могут быть и слоисто-кучевые.

Размер кучевообразных облаков на снимках может сильно варьировать от величины облачного элемента, равного элементу разрешения на местности аппаратуры спутника, до облачного образования поперечником в сотню километров.

В том случае, если конвективные облака меньше элемента разрешения аппаратуры видимого диапазона, участки, занятые такими облаками, выглядят на снимках как поля повышенной яркости. Кучевообразная структура при съемке в этом случае не улавливается.

Наличие кучевообразной облачности свидетельствует о неустойчивости стратификации атмосферы в том слое, где развита такая облачность.

Формально спутниковые снимки дают сведения только об облачности. Однако облака, и в первую очередь их структурные особенности, пред-

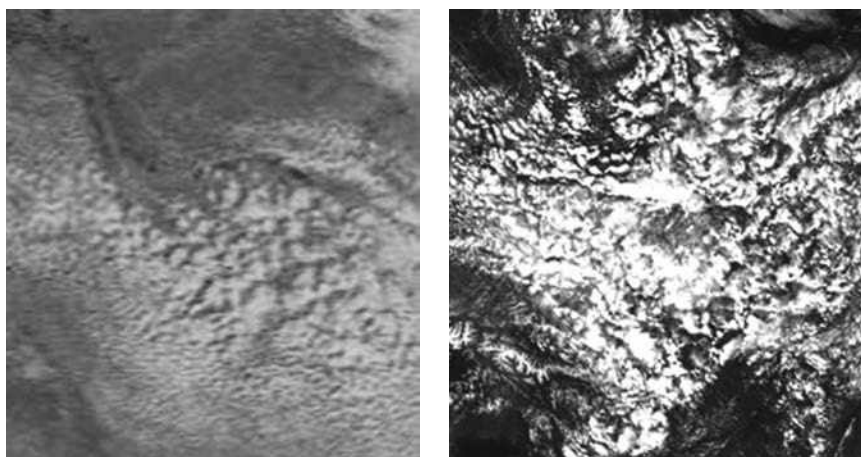


Рис. 1.10. Кучевообразные облака.

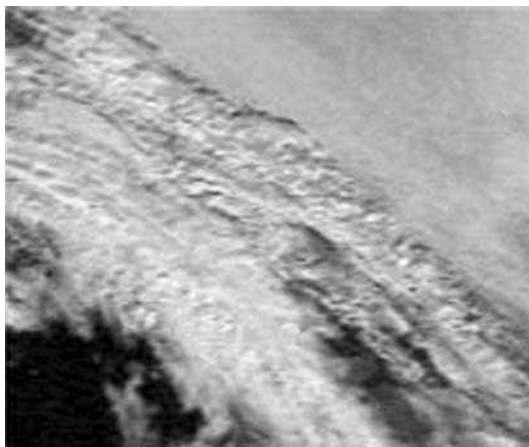


Рис. 1.11. Слоисто-кучевая облачность.

ставляют собой следствие развивающихся в атмосфере процессов. Отсюда следует возможность определения по изображению облаков тех синоптических условий, при которых они возникли. В связи с этим обнаружение структурных особенностей облачности является одним из основных качеств спутниковой информации. Слоисто-кучевообразные облака на спутниковых снимках имеют вид крупных или мелких гранул. Текстура их, так же как и кучевообразных облаков, зернистая (рис. 1.11).

На изображениях с ИСЗ кучево-дождевые облака распознаются сравнительно легко. Они достаточно резко отличаются от облаков других форм как по большой яркости, так и по большому размеру. Кучево-дождевые облака на снимке видны как яркие пятна. Облака имеют в поперечнике 10—40 км, а иногда 100 км и более. Облачные образования диаметром около 100 км и более представляют собой скопление отдельных кучево-дождевых облаков, у которых наковальни слились и образовали сплошной покров перистых облаков.

На изображениях можно выделить шесть признаков кучево-дождевых облаков:

- 1) обособленность;
- 2) наибольшая яркость;
- 3) куполообразный вид;
- 4) тени, отбрасываемые облаком на подстилающую поверхность или на расположенные ниже облака;
- 5) наковальни перистых облаков;
- 6) шлейф перистых облаков.

Шлейф перистых облаков наблюдается при наличии вертикального сдвига ветра. В этом случае наветренный край кучево-дождевого облака резкий, а подветренный, куда происходит снос перистых облаков, раз-

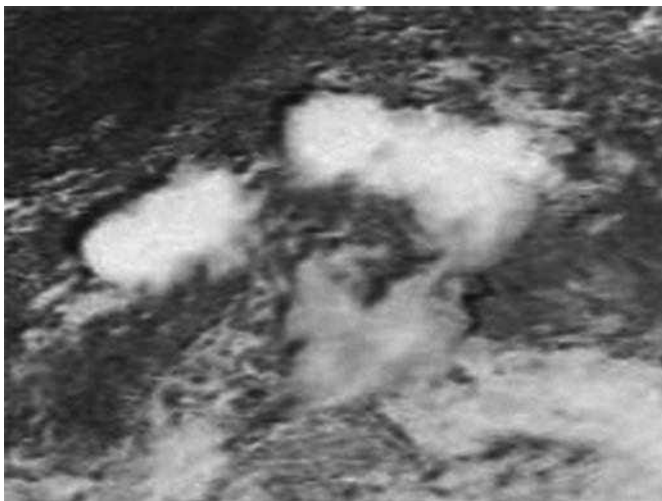


Рис. 1.12. Кучево-дождевые облака.

мытый. Шлейф перистых облаков простирается по направлению ветра на уровне облаков. В связи с этим по изображению кучево-дождевых облаков можно определять направление воздушных потоков в верхней тропосфере (на уровне перистых облаков), а они в некоторой степени характеризуют перемещение самих кучево-дождевых облаков.

На рис. 1.12 представлены кучево-дождевые облака.

Кучево-дождевые облака интересуют метеорологов как в связи с прогнозом гроз, ливней и шквалистых ветров, так и из-за той дополнительной информации о поле температуры и ветра в данном районе.

Непрерывные наблюдения за облачным покровом со спутников показали, что распределение облачности характеризуется целым рядом закономерностей. Высокая упорядоченность облачных полей выразилась в существовании неизвестных до этого структурных особенностей, свойственных определенным процессам. В частности, со спутника оказались хорошо видны: вихревая структура облачности, связанная с циклонической циркуляцией, широкие облачные полосы, обычно соответствующие фронтам, более узкие полосы и гряды и, наконец, ячейки. Эти основные элементы структуры облачности и используются в анализе.

1.4.2. ВЛИЯНИЕ МАТЕРИКОВ И ОКЕАНОВ НА ОБЛАЧНЫЕ ПОЛЯ

Различия облачных полей над материками и океанами связаны как с разной скоростью ветра, что обусловлено различием шероховатости подстилающей поверхности, так и с масштабами неоднородности этих типов подстилающей поверхности и различием их теплофизических свойств.

Над однородной поверхностью океанов циклоны с их вихревой структурой выражены более четко, чем над материками с их неоднородностью

и неровностями различного масштаба. Над материками, кроме того, циклонические облачные образования демонстрируют менее «правильный» рисунок вихрей и разнообразные отклонения фронтальных облачных систем от типичных вариантов.

Так, наиболее обширные циклоны с соответствующими им полями облачности, как правило, прослеживаются над океанами — в Северном полушарии над акваториями Тихого и Атлантического океанов.

Над континентами размеры циклонов в целом меньше, чем над океанами, и, кроме того, как повторяемость формирования циклонов, так и все параметры облачности, связанной с циклонами, в частности фронтальной, сильнее зависят от времени года, чем над океанами. Это связано с тем, что изменчивость теплофизических свойств как поверхности, так и воздуха над ней в течение года в случае континентов больше, чем в случае океанов. Кроме того, для материков характерна более «пестрая» подстилающая поверхность.

Ярким примером может служить Евроазиатский континент. Над европейской территорией материка циклонические образования чаще формируются и проходят в холодный период, особенно зимой. Интенсивная циклоническая деятельность в это время связана с большими горизонтальными градиентами температуры. В то же время над азиатской территорией того же материка циклоны прослеживаются чаще летом, что в большой мере связано с сильным влиянием обширного и мощного зимнего барического образования — азиатского антициклона с центром над Монголией.

Характер подстилающей поверхности оказывает влияние на циклонические серии. Поскольку серии циклонов чаще наблюдаются над более однородной подстилающей поверхностью, где условия формирования всех циклонов данной серии примерно одинаковы, они, как правило, прослеживаются над океаническими поверхностями. Что касается таких последовательностей над сушей, особенно над ее участками со сложным рельефом, то упомянутые серии здесь редко бывают большими. Чаще они состоят из двух-трех циклонов, причем каждый из них не обязательно проходит все стадии развития.

На атмосферные фронты оказывают влияние и материки, и океаны, причем это влияние неодинаково по силе проявления в случае фронтов разных типов и в разные сезоны года.

В летнее время материки оказывают существенное влияние на атмосферные фронты и их системы облаков. При летних условиях они могут значительно отличаться от традиционной облачной системы теплого фронта. Так, сплошного слоя облачность перед фронтом может собой и не представлять. Более того, типичные ярусные облака в ряде случаев в дневные часы сменяют облака вертикального развития — кучевые, а в некоторых случаях и кучево-дождевые (особенно в центральной части циклона), что зависит от степени прогрева материка и последующего сдвига стратификации воздуха в сторону потери устойчивости, а также от влажности воздуха. В результате теплые фронты под влиянием прогретой или перегретой

подстилающей поверхности и сильных восходящих движений могут быть связаны с ливневыми дождями и грозами.

Под влиянием материков в летнее время, особенно в дневные часы, вместо высокослоистых облаков в облачной системе теплого фронта иногда появляются высококучевые, а нижняя граница слоисто-дождевых облаков располагается настолько высоко, что мощность их невелика и фронтальные осадки из них не выпадают.

Различия в облачных полях, как и в связанных с ними полях других атмосферных явлений, во фронтальных зонах летом в зависимости от времени суток под влиянием подстилающей поверхности материков проявляются и в том, что при прохождении холодных фронтов наиболее развитые кучево-дождевые облака и грозы чаще всего фиксируются в дневное время, а при прохождении теплых фронтов — в ночные часы.

Это обусловлено тем, что на теплых фронтах наиболее интенсивные восходящие движения теплого воздуха происходят тогда, когда он поднимается вдоль клина достаточно охлажденного воздуха, что имеет место в ночные часы. Именно в это время континенты могут заметно охладиться, ведь суточный ход температуры подстилающей поверхности материков и прилегающих к ним слоев воздуха в летнее время достаточно большой. Ночью при прохождении теплого фронта формируются несколько большие горизонтальные градиенты между холодной воздушной массой в передней части циклона (дополнительно охлажденной в ночные часы) и теплой воздушной массой (поступающей с южной составляющей ветра), чем днем, ведь перегрев подстилающей поверхности при наличии сплошной ярусной облачности случается далеко не всегда.

Подстилающая поверхность оказывает влияние и на фронты окклюзии, в частности на формирование определенных типов верхних фронтов над ними. Так, например, в европейской части Евразии в зимнее время в тылу циклона оказывается морской, а, следовательно, более теплый воздух, а в передней части того же циклона — более холодный континентальный воздух. Когда циклон становится окклюдированным, фронт окклюзии представляет собой фронт по типу теплого фронта. В этом случае менее холодный морского происхождения воздух натекает на клин более холодного континентального воздуха, продвигая вытесненную теплую воздушную массу вверх, как и зону раздела между указанной менее холодной воздушной массой и теплой воздушной массой. В результате в более высоком слое над подстилающей поверхностью образуется верхний холодный фронт, который занимает положение впереди нижнего фронта окклюзии по типу теплого фронта.

В летнее время, когда поверхность континента теплее поверхности океанов, наблюдается иная ситуация. Поскольку в тылу циклонов летом оказывается морская воздушная масса, более холодная, чем масса в передней части этих образований, то на стадии окклюдированного циклона в нем формируется фронт окклюзии по типу холодного фронта. В этом случае

более холодный морской воздух подтекает под менее холодный континентальный воздух передней части циклона. Менее холодная воздушная масса поднимается вдоль клина более холодной воздушной массы, способствуя продвижению вверх теплой воздушной массы и зоны раздела между этой, менее холодной и теплой воздушной массой. В результате образуется верхний теплый фронт, который занимает положение позади нижнего фронта окклюзии по типу холодного фронта.

Таким образом, в любом случае верхние фронты образуются за счет взаимодействия менее холодной и теплой воздушной массы. Более холодный воздух остается в нижнем слое, и его взаимодействия с теплой воздушной массой, вытесненной в более высокий слой, не происходит. Расположение верхнего фронта относительно нижнего связано с тем, что атмосферный фронт всегда имеет наклон в сторону холодного воздуха, а в случае фронтов окклюзии — в сторону более холодного воздуха. Именно это положение фронта обеспечивает в столбе воздуха такое распределение его плотности, при котором более плотный воздух оказывается внизу, а менее плотный воздух — вверх. Менее холодный воздух перемещает теплый воздух вдоль фронта окклюзии вверх, поэтому в случае фронтов окклюзии по типу холодного верхний фронт оказывается позади него (верхний теплый фронт), а в случаях фронтов окклюзии по типу теплого верхний фронт оказывается впереди него (верхний холодный фронт).

Если разбирать рассмотренную выше ситуацию над территорией Дальнего Востока, то картина с формированием фронтов окклюзии и верхних фронтов над ними окажется совсем иной. Так, зимой здесь будут преобладать холодные фронты окклюзии, поскольку континент в этой части Евразии сильно выхолаживается, и, следовательно, континентальный, очень холодный воздух окажется в тылу циклона, а более теплый океанический воздух — в передней части циклона (перед теплым фронтом). В этом случае при окклюдировании циклона в зимнее время образуется фронт окклюзии по типу холодного, а верхний фронт — теплый. Летом над Дальним Востоком чаще встречаются фронты окклюзии по типу теплого фронта, а верхние фронты будут холодными.

Итак, в случае фронтов окклюзии характер адвекции в нижнем и верхнем слоях различен и зависит от типа этого фронта. При фронте окклюзии по типу теплого в нижнем слое наблюдается адвекция тепла, а в верхнем слое — адвекция холода. При фронте окклюзии по типу холодного адвекция холода осуществляется в нижнем слое, а в верхнем происходит адвекция тепла.

Иная картина складывается при перемещении воздуха с континента на океан. В этом случае скорость ветра увеличивается, создается дивергенция воздушных потоков, приводящая к рассеянию облаков, и либо их количество над водой около берега уменьшается, либо они рассеиваются полностью. Через некоторое время и при дальнейшем удалении от материка за счет увеличения влажности воздуха вновь формируется облачность, но это уже отдельный процесс.

Достаточно интересные изменения происходят в полях облаков при перемещении фронтов с материка на океан либо с океана на материк.

При перемещении фронтов с материка на океан в зимнее время неустойчивость воздуха возрастает. Это связано с некоторым прогревом сильно охлажденных воздушных масс над сушей за счет более теплой водной поверхности. В таких случаях может образоваться кучево-дождевая облачность, не характерная для зимнего периода, причем не только на холодных, но иногда и на теплых фронтах. Реализация такой возможности существенно зависит от разности значений температуры поверхности материка и океана.

Иная картина наблюдается в зимний период при смещении фронтов с океана на материк.

Если смещается быстро движущийся холодный фронт, то облачная система, представленная кучево-дождевыми облаками, над материком трансформируется. Мощность кучево-дождевых облаков постепенно будет уменьшаться, они будут растекаться по горизонтали вследствие ослабления восходящих движений, и в дальнейшем фронтальная система будет представлена ярусными фронтальными облаками. Вместо кучево-дождевых облаков через некоторое время будут наблюдаться облака слоисто-дождевые и высокостолбистые. Скорость указанной трансформации зависит от разности значений температуры на поверхности океана и материка, от скорости смещения фронта, от влажности смещающегося воздуха. При быстром смещении фронта и связанной с ним облачности трансформация произойдет дальше от океана, при более медленном — ближе к побережью и океану.

Следует учесть, что при перемещении фронта с океана на материк в любом случае скорость смещения воздушных масс и фронтальной зоны между ними уменьшается, поскольку увеличивается сила трения. Это способствует трансформации самого фронта: из быстро смещающегося он может стать медленно смещающимся фронтом, что неминуемо приведет к трансформации облаков.

Иногда кучево-дождевые облака на холодных фронтах в зимнее время могут сохраняться при перемещении этих фронтов из районов северных морей на материк, если температура последнего не имеет низких отрицательных значений или имеет положительные значения, а следовательно, и перемещающийся воздух незначительно охладится при переходе на материк.

Понятно, что такие ситуации характерны для европейских районов и не отмечаются в холодный период в районах Азии, где в зимний период материк существенно охлаждается.

После смещения теплых фронтов с океана на материк в летнее время в целом ряде случаев фронтальные облака рассеиваются, чего нельзя однозначно сказать об облаках холодных фронтов. Это связано с разнонаправленным влиянием изменения состояния холодного воздуха в сторону большей неустойчивости и уменьшения влажности над континентом.

Ячейки могут проследиваться за холодными фронтами, о чем говорилось выше.

Облачные ячейки — это тот вид облаков, который был обнаружен на снимках с ИСЗ и в дальнейшем широко использовался для диагноза состояния воздушных масс, поскольку связан с определенным изменением вертикального градиента температуры с высотой в этих массах.

Ячейки бывают открытыми и закрытыми, различаясь между собой не только расположением облаков, но и их формой.

Открытые ячейки более характерны для кучевообразных облаков различной мощности (кучевых, мощных кучевых, кучево-дождевых). Внутри такой конвективной ячейки открытого типа конвективные облака располагаются на ее периферии, а центральная часть этой ячейки от облаков свободна. В случае открытых ячеек более холодный воздух перемещается над более теплой подстилающей поверхностью. Вертикальный градиент температуры с высотой уменьшается, иногда переходя от положительных значений к отрицательным, причем выше конвективного слоя расположен инверсионный слой. Именно при таких условиях в центре ячейки устанавливаются нисходящие движения, а на ее периферии — восходящие. Чаще всего открытые ячейки образуются над теплыми океаническими течениями в холодный период года.

Закрытые ячейки обычно формируются в полях слоисто-кучевых облаков, хотя могут быть, как указано выше, образованы и кучевообразными облаками. Центральная часть таких ячеек занята облаками, а их периферия от облаков свободна. Вертикальный градиент температуры в случае закрытых ячеек с высотой увеличивается. При этом восходящие движения имеют место в центре ячеек, а нисходящие — на их периферии. Часто закрытые ячейки проследиваются над холодными океаническими течениями в теплый период, когда вертикальный градиент температуры имеет в нижней части конвективного слоя отрицательные значения, а с высотой меняет знак и далее возрастает.

Таким образом, характер ячейковой конвекции определяется стратификацией атмосферы на фоне влияния подстилающей поверхности.

Из приведенной выше информации следует, что в образовании ячеек заметную роль играют процессы адвекции воздушных масс, а также направление и скорость вертикального движения воздуха. При адвекции холодных воздушных масс или при преобладающем нисходящем движении воздуха формируются открытые ячейки. При адвекции же теплой воздушной массы или при преобладающем восходящем движении воздуха образуются закрытые ячейки.

Заметим также, что ячейковая структура в облачных полях не связана с очень интенсивными движениями по вертикали в любом направлении, поскольку при очень интенсивных нисходящих движениях значительно увеличивается внутренняя энергия воздуха, за счет которой эти движения совершаются. В таких случаях температура воздуха сильно повышается

и он заметно удаляется от состояния насыщения водяным паром, что не способствует образованию или сохранению облаков. Сильные же восходящие движения приводят к формированию других облаков, не связанных с ячейковой структурой в их полях. Сказанное подтверждается и наземными, и спутниковыми данными.

И открытые, и закрытые ячейки представляют собой систему облаков, элементами которой являются более или менее правильные многоугольники. Чаще всего многоугольники бывают неправильными, т. е. не обладают симметрией. Впрочем, это зависит от горизонтального поля давления: чем меньше значения горизонтальных градиентов давления, тем более симметричными бывают ячейки. Важно заметить, что симметричность ячеек зависит и от скорости ветра: при невысокой скорости ветра вероятность более «правильных» ячеек увеличивается, а с увеличением скорости симметричность утрачивается. Вместе с тем значения скорости ветра как раз и определяются характером поля давления. При усилении ветра симметрия ячеек всегда нарушается, что хорошо прослеживается на снимках облачности с ИСЗ.

Открытые ячейки свидетельствуют о том, что более холодный воздух перемещается над более теплой подстилающей поверхностью, а закрытые — о том, что более теплый воздух перемещается над более холодной подстилающей поверхностью.

Более яркое проявление, как и более правильное строение, конвективные ячейки имеют в слоях воздуха над поверхностью океанов по сравнению с их характером над поверхностью суши.

Важно еще раз заметить, что выше конвективного слоя ячеек любого типа располагается устойчивый слой, чаще всего температурная инверсия.

Что касается горизонтальных размеров ячеек, то принято считать размеры и открытых, и закрытых ячеек примерно одинаковыми, и диаметр их в преобладающем числе случаев составляет примерно 20—60 км (при самом вероятном значении 30—40 км). Лишь в отдельных случаях диаметр ячеек достигает 100 км и более.

Следует отметить, что на снимках облачности с ИСЗ размеры закрытых ячеек кажутся меньше, чем открытых. Это связано с тем, что последние ограничены по периметру облачными элементами, а закрытые ячейки имеют безоблачный периметр, который сливается с межоблачным пространством (участками между ячейками), т. е. невиден.

Диаметр ячеек, как и соотношение облачных и безоблачных участков между ними, определяются вертикальным градиентом температуры и влажностью конвективного слоя, в котором ячейки формируются, а также мощностью этого слоя.

В полях ячеек нередко прослеживаются облачные объекты мезомасштабного проявления — гряды ячеек. Грядовая структура ячеек связана с монотонным и заметным увеличением скорости ветра в слое формирования ячеек при неизменном направлении ветра. Большого пространства

в полях конвективных ячеек гряды могут и не занимать, но в оперативной работе (в практике нефанализа) всегда тщательно изображаются все направления гряд ячеек. Это связано с тем, что по ним можно судить о направлении ветра (строго говоря, термического ветра) в отдельных районах, поскольку гряды располагаются вдоль воздушного потока или с небольшим отклонением от него.

В любом случае наличие гряд свидетельствует о повышенной скорости ветра и увеличении ее с высотой при неизменном направлении ветра.

Особенно ценна данная информация, когда данных о параметрах атмосферы недостаточно, например в случае акватории океана.

Материки и океаны оказывают влияние на струйные течения, в частности на связанные с ними облачные поля, о которых подробно речь говорилось выше. Внешний вид струйного течения различается в зависимости от типа подстилающей поверхности — океана или материка. Протяженность полосы или лент перистых облаков справа от оси струйного течения над океанами больше, чем над сушей, иногда в два раза и более.

1.4.3. МОДЕЛИ НЕКОТОРЫХ ОБЛАЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Полосы перистых облаков

Длинное узкое перистое облако (Ci) может располагаться вдоль высотного воздушного течения, типичным примером которого является струйное течение. Полоса Ci располагается в высотной ложбине, наблюдаемой на высотных картах барической топографии и, как правило, имеет антициклоническую кривизну.

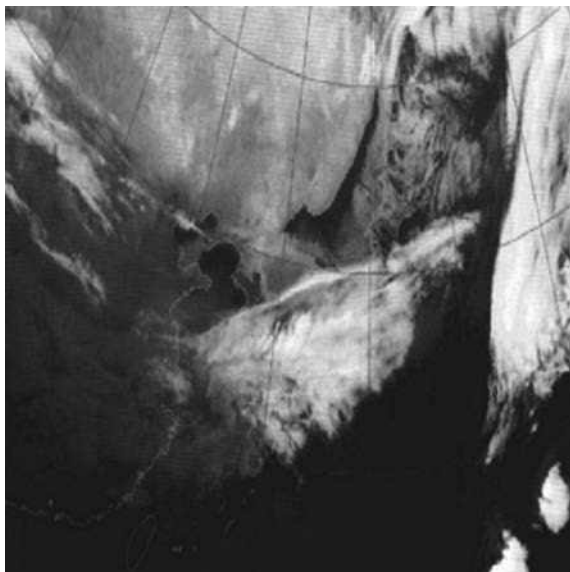


Рис. 1.13. ИК изображение поперечной линии Ci.

Полоса C_i на изображениях может принимать форму небольшой облачной линии, почти перпендикулярной направлению воздушного потока, которая называется поперечной линией (рис. 1.13).

Перистая наковальня

Когда кучево-дождевое облако находится на максимальной стадии своего развития и начинает распадаться, верхняя его часть удерживается тропопаузой и оно растекается горизонтально, образуя структуру, внешне похожую на наковальню. Наковальня, состоящая из перистых облаков, простирается в виде шлейфа от C_b в основном с подветренной стороны (рис. 1.14, 1.15) и имеет край, более «пушистый» чем край облака C_b . Вы-

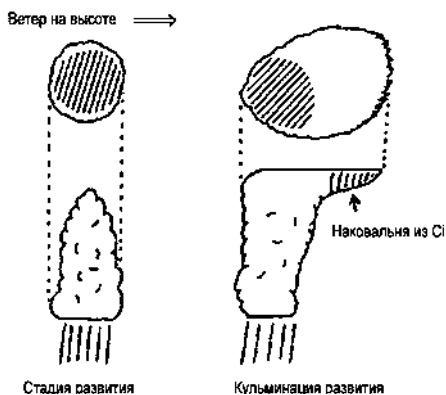


Рис. 1.14. Формирование «наковальни» из кучево-дождевого облака.

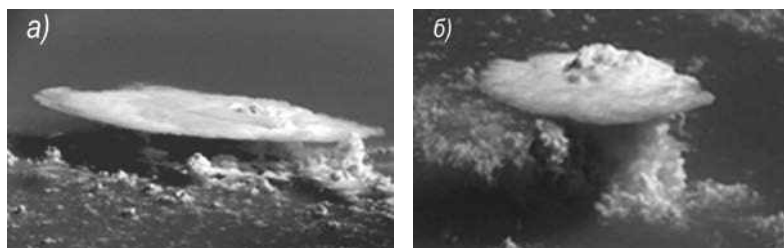


Рис. 1.15. Изображения «наковальни», полученные с борта МКС.

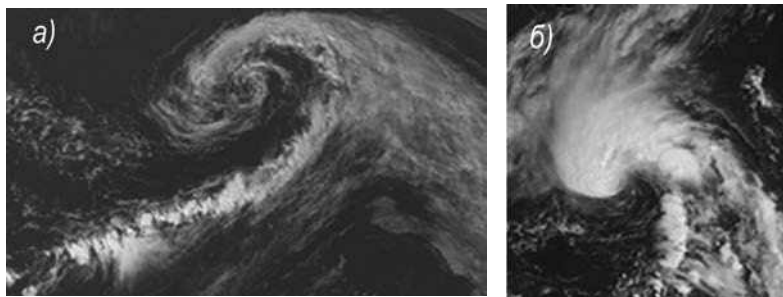


Рис. 1.16. Кучевые облака в структуре холодного атмосферного фронта циклона.

сота вершины наковальни примерно такая же, как у Сб. Однако отличие от последнего существенно, поскольку наковальня не дает сильного дождя. Кучевые облака в структуре холодного атмосферного фронта циклона показаны на рис. 1.16.

Закрытые и открытые конвективные ячейки

На снимках атмосферы часто наблюдаются мезомасштабные конвективные облачные образования, которые обычно формируются над водной поверхностью и имеют значительные размеры, являясь индикаторами неустойчивой стратификации нижнего слоя атмосферы. Они обнаруживаются на спутниковых изображениях, полученных в видимом диапазоне, горизонтальные размеры которых находятся в пределах от нескольких километров до нескольких десятков километров. В большинстве случаев облачность в облачных ячейках состоит из ячеек округлой или полигональной формы, которые часто выстроены в полосы или гряды.

Различают два типа конвективных ячеек: закрытые ячейки с облачностью в центре и безоблачным пространством на периферии (рис. 1.17 слева) и открытые ячейки с безоблачным пространством в центре и тонким облачным кольцом по периферии (рис. 1.17 справа).

Распределение облачности в открытой ячейке соответствует восходящим движениям воздуха на периферии ячейки и нисходящим движениям в ее центре (структура движения воздуха в них показана на рис. 1.18 *а*). В закрытой ячейке соответственно восходящие движения воздуха в центре и нисходящие — на периферии (рис. 1.18 *б*).

Конвективные ячейки в поле облачности могут иметь разнообразную форму, которая зависит от термодинамических условий их формирования и ско-

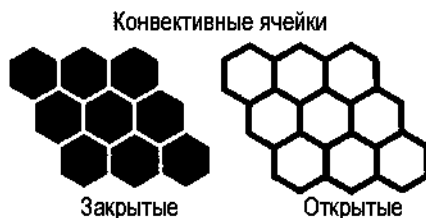


Рис. 1.17. Формы конвективных ячеек.

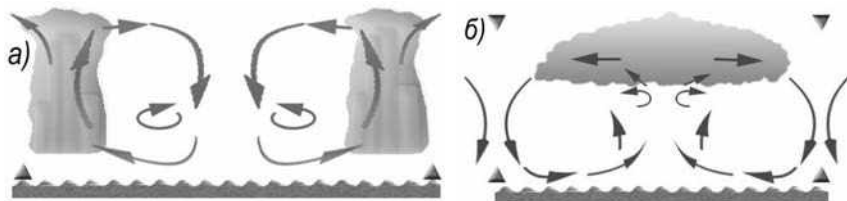


Рис. 1.18. Схемы циркуляции воздуха в открытых (*а*) и закрытых (*б*) конвективных ячейках.

рости ветра. При слабом ветре ячейки имеют вид почти правильных многоугольников. При умеренном и сильном ветре симметрия ячеек нарушается.

Примеры изображения конвективных ячеек приведены на рис. 1.19 и 1.20.

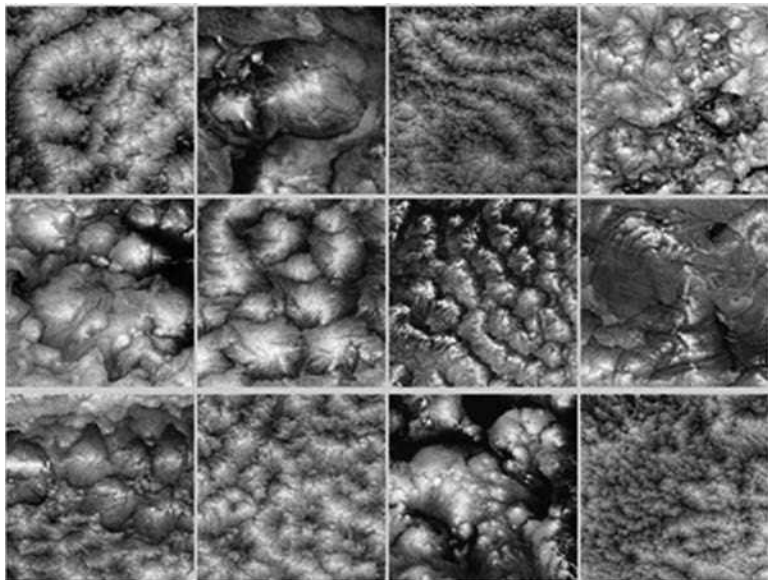


Рис. 1.19. Облачные ячейки закрытого типа.

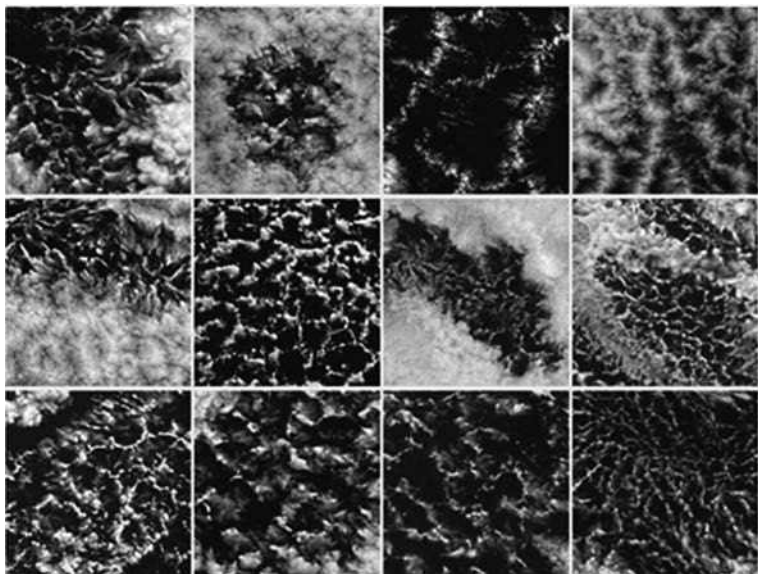


Рис. 1.20. Облачные ячейки открытого типа.

Было показано, что горизонтальные размеры открытых и закрытых ячеек примерно одинаковы: диаметр закрытых ячеек составляет 30—40 км, а открытых ячеек — 20—60 км. Общий диаметр ячейки и соотношение между облачной и безоблачной зонами зависят от мощности конвективного слоя, вертикального градиента температуры и относительной влажности в слое конвекции. Соотношение диаметров облачной и безоблачной зон для закрытых ячеек в среднем составляет 5, а для открытых ячеек — 0,5; диаметр конвективных ячеек относится к их вертикальной мощности как 30:1 (открытый тип) и 21:1 (закрытый тип). Характер циркуляции внутри ячейки зависит как от вертикального градиента температуры и мощности конвективного слоя, так и от кривизны температурного профиля. Вид облачной ячейки (открытая или закрытая) зависит от распределения градиента температуры с высотой. Когда градиент температуры убывает, образуются открытые облачные ячейки с нисходящими движениями в центре. Когда градиент температуры возрастает, образуются закрытые облачные ячейки с восходящими движениями в центре. Характер стратификации и устойчивость атмосферы также влияют на этот процесс.

Конвективные ячейки открытого типа образуются в постепенно нагреваемых воздушных массах и характеризуют районы адвекции холодных воздушных масс или районы с нисходящими крупномасштабными движениями. Образование ячеек, связанных с холодными вторжениями, происходит над теплыми океаническими течениями при движении холодного воздуха на восток от континентов. Формирование облачности начинается через 12—18 часов после прохождения фронта в результате сильного нагревания воздуха и поступления влаги снизу. Вначале преобладают облака кучевых форм, но в дальнейшем они трансформируются в слоисто-кучевые — по мере того, как они распространяются ниже слоя инверсии. Этот процесс может существовать несколько дней после прохождения внутритропического циклопа. В хорошо перемешанном пограничном слое развиваются в основном открытые ячейки, хотя рядом с ними могут наблюдаться и закрытые.

Конвективные ячейки закрытого типа образуются в постепенно охлаждающихся воздушных массах и характеризуют районы адвекции теплых воздушных масс или районы с восходящими крупномасштабными потоками. Формирование ячеек, связанных с полями слоисто-кучевых облаков над морем, которые образуются над более холодными участками океана, происходит в основном к западу от континентов. Слоисто-кучевая облачность обычно довольно устойчива и может существовать от нескольких дней до недели. В таких условиях формируются преимущественно закрытые конвективные ячейки.

Установлено также, что закрытые облачные ячейки встречаются преимущественно среди слоисто-кучевых облаков над холодной водной поверхностью. Конвективные ячейки открытого типа характерны для облаков кучевых форм.

В результате характеристики образующихся в пограничном слое атмосферы над океаном облачных ячеек определяются совместным воздействием нескольких механизмов:

- нагревом на нижней границе;
- радиационными процессами на верхней границе;
- высвобождением тепла фазовых переходов в облаках;
- крупномасштабными вертикальными движениями;
- температурой и влажностью воздуха в слое инверсии, вовлечением и другими процессами.

Облачная улица

Если интрузия континентального холодного сухого воздуха (или холодного воздуха с ледяной поверхности) распространяется над соседней относительно теплой поверхностью океана, то можно увидеть структуры облачности в виде протяженной «улицы». Такая ситуация характерна также для тыловой части циклона за холодным фронтом.

Облачная улица формирует облачный узор из множества облачных линий, состоящих из облаков Cu , Cg и т. п., расположенных параллельно направлению ветра на более низком уровне. Высота верхней границы облаков практически постоянна. Вертикальный сдвиг по направлению ветра невелик в облачных слоях, но вертикальный сдвиг по скорости ветра велик по сравнению с открытыми и закрытыми ячейками. Организацию облаков в «улицы» можно объяснить наличием горизонтальной турбулентности в пограничном слое.

Если более холодный воздух покидает поверхность суши или льда, то его свойства изменяются за счет вертикального переноса тепла и влаги от подстилающей водной поверхности. В этом случае образуется инверсионный слой, основание которого поднимается по мере удаления от берега (рис. 1.21).

Преобразование воздушных масс приводит в конечном итоге к образованию облаков, которые при определенных условиях принимают форму облачных улиц и развиваются примерно параллельно направлению ветра.

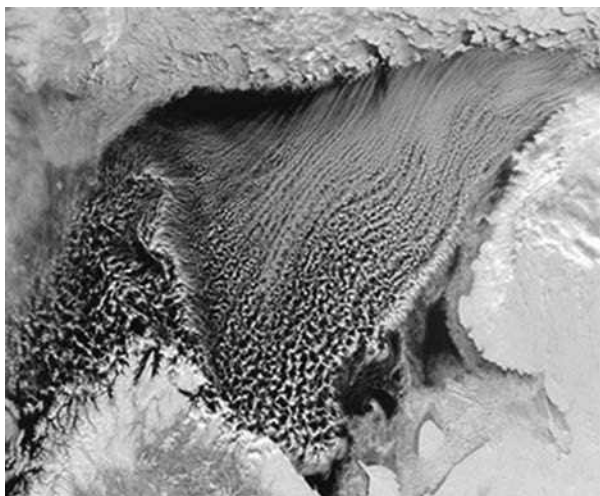


Рис. 1.21. Облачные улицы в Баренцевом море.

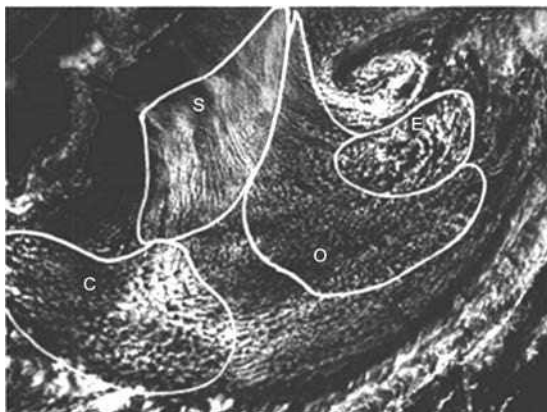


Рис. 1.22. Изображение ячеистой структуры в видимом диапазоне.

О — открытые ячейки, С — закрытые ячейки, S — облачные улицы, Е — усиленные кучевые облака.

Далее улицы развиваются в объемные открытые ячейки, затем интенсивность конвекции возрастает и начинают формироваться мощные кучевые облака. Эти структуры можно часто наблюдать весной и зимой над полярными водами, а также над холодными водами средних широт.

Облачный кластер (Cb-кластер)

Кучево-дождевые облака в большинстве случаев существуют независимо друг от друга, но они могут собираться вместе, образуя обширную совокупность. Такое образование называется облачным кластером. Скопление облаков состоит из конвективных облаков разного размера и на разных стадиях развития, а по горизонтали оно простирается на несколько сотен километров. Линия шквала, многоячейковые области и т. п. известны как мезомасштабная конвективная система, которую можно распознать на снимках с ИСЗ (рис. 1.22).

Актиноморфные облака

Относительно недавно на снимках видимого диапазона были обнаружены сложные актиноподобные (название от морского организма актинии) формы, которые, по-видимому, являются не отдельными образованиями, а кластерами ячеек. В них открытые и закрытые ячейки имеют приблизительно одинаковые размеры, в большинстве случаев их диаметр варьирует от 10 до 60 км, достигая в отдельных случаях 100 км. Наиболее велика повторяемость ячеек размером 20—50 км. Актиноморфные облака наблюдаются в Тихом океане около Южной Америки.

Из космоса актиноморфные облака выглядят как огромные облачные образования, похожие на лучи длиной в сотни километров. Обычно они предвещают погоду с моросящим дождем. Со временем выяснилось, что образующиеся структуры в виде розетки представляют собой облака, которые называются актиноморфными. Ученые описывают их как «совокупность мелких облаков, организующихся в четкую радиальную структуру».

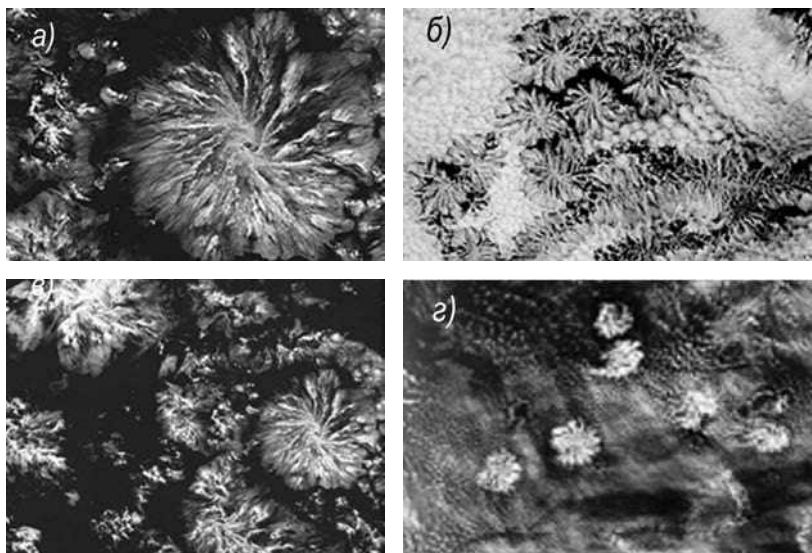


Рис. 1.23. Примеры изображений актиноморфных облаков.

Такие облака могут принимать разные формы, при этом не нарушая структуру, а максимальное время их существования достигает 72 часов. Данный вид облаков был впервые обнаружен в 1962 г., но до настоящего времени о них мало что стало известно. Актиноморфные облака являются предметом активных исследований.

Структура поля облачности представляет собой совокупность мелких облаков, которые объединяются в четкую радиальную структуру. Иногда облачная система появляется с листообразной формой или в виде спиц на колесе с радиальными элементами, называемыми актиниями. Форма разных актиноморфных облаков несколько различается, но общая структура остается неизменной. Актиноморфные облачные системы невозможно распознать с поверхности Земли, потому что они проявляются на больших масштабах (иногда достигая 300 километров в поперечнике) в полях слоисто-кучевоы облачности, обычно находящихся над открытым океаном. На рис. 1.23 приведены изображения основных структур актиноморфных облаков.

1.5. ВЫВОДЫ

1. Новые средства наблюдения за состоянием атмосферы обуславливают разработку новых методов получения информации, в том числе разработку теорий и выдвижения гипотез по правилам предметной области.

2. Применение дистанционного зондирования дало возможность изучать облачность как индикатор происходящих в атмосфере гидротермодинамических процессов.

Глава 2

НОРВЕЖСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ (ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ)

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как было отмечено выше, методы исследования в науках о Земле основаны на теориях, которые, в свою очередь, основаны на наблюдениях, а также на моделировании реальных природных процессов, на котором базируются теоретические идеализации. Парадигма развития в таком случае формирует научную базу для поисков дальнейшего понимания жизненных циклов природных образований больших размеров, в том числе внетропических циклонов. Однако в таком случае — когда изучаемые объекты не могут быть воспроизведены в эксперименте, используется моделирование только основополагающих моментов.

Тур Бержерон, один из основателей синоптической метеорологии, предложил считать концепцию жизненного цикла атмосферного циклона как научным, так и системным процессом, длящимся по следующим циклам:

- производство наблюдений,
- проведение анализа,
- проведение диагноза,
- физическое понимание процесса,
- составление прогноза.

Бержерон также отмечал, что переход от наблюдений и анализа полученных данных непосредственно к прогнозу без применения теории и диагноза приводит к неполному пониманию физических процессов и снижает его достоверность.

Образно волновую норвежскую модель атмосферного циклона, которая используется и в настоящее время, можно охарактеризовать следующим образом: циклон рождается как начальная волна на полярном фронте Сольберга, развивается в идеальный циклон Бьеркнеса и в заключение приходит к своему концу как окклюзия Бержерона.

Модель жизненного цикла фронтального циклона была разработана на основе данных наблюдений и понятия о воздушных массах — обширных областях с однородными (гомогенными) стационарными полями метеозле-

ментов. Внутри такой области воздух будет в течение достаточно продолжительного времени подвержен одним и тем же влияниям (будет «одного и того же происхождения») и формироваться практически одними и теми же физическими процессами). Это явление и станет причиной формирования довольно однородной в горизонтальном направлении (на всех высотах) воздушной массы того же порядка величины, что и основные течения в общей циркуляции атмосферы.

На основе изучения взаимодействия воздушных масс была выдвинута гипотеза о существовании переходных зон между воздушными массами с различными свойствами — зон атмосферных фронтов, и в зависимости от того, какая воздушная масса какую замещает, они были названы «холодной» или «теплой». Границы между такими воздушными массами превращаются в узкие слои, в которых горизонтальные градиенты метеорологических элементов намного больше, чем внутри воздушной массы. Ширина переходной зоны между соседними воздушными массами была оценена диапазоном 200—500 км.

2.1.1. РОЛЬ ВОЗДУШНЫХ МАСС И ФРОНТОВ В ФОРМИРОВАНИИ ПОЛЯРНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЦИКЛОНОВ

Введение специального понятия о воздушных массах позволило выявить закономерности формирования атмосферных фронтов и циклонов. Основные физические свойства воздушных масс определяются главным образом, географическими условиями того региона Земли, где они формируются. Такое место иногда называют «очагом массы» — это обширный район с достаточно однородной подстилающей поверхностью и с одинаковым влиянием ее на находящийся над ним воздух. При длительном пребывании в очаге массы воздух приобретает свойства однородной воздушной массы, в которой горизонтальные градиенты метеорологических элементов становятся небольшими, а облачность приобретает особенности, характерные для данной воздушной массы.

Использование географической классификации воздушных масс для целей синоптической метеорологии было предложено на основании анализа процессов формирования и расположения воздушных масс во вращающейся атмосфере Земли (в модели общей циркуляции). Число зон циркуляции определяется физическими свойствами, которые авторы моделей общей циркуляции считают определяющими в концепции жизненного цикла атмосферного циклона. Для оценки свойств воздушных масс достаточно использовать распределения температуры и влажности, как основных метеорологических параметров, которыми оценивается процесс облакообразования.

В целях наблюдения циркуляционных фронтальных атмосферных образований больших масштабов достаточно использовать одну из классификаций воздушных масс по признаку района их формирования, например четырехчастную:

- 1) арктическая (антарктическая) воздушная масса;
- 2) полярная воздушная масса, или воздушная масса умеренных широт, которая располагается в широтной зоне от 45 до 65°; эти массы формируются над континентом и зимой они сухие и холодные, а летом их температура и влажность значительно выше;
- 3) тропическая воздушная масса, образующаяся в тропических широтах, для которой характерны повышенные значения температуры;
- 4) экваториальный воздух, который в отличие от сухого континентального воздуха является морским и влажным.

Для целей настоящей работы достаточно рассматривать только полярный и арктический фронты — они были названы по названию более холодной из двух воздушных масс, которые они разделяют (рис. 2.1).

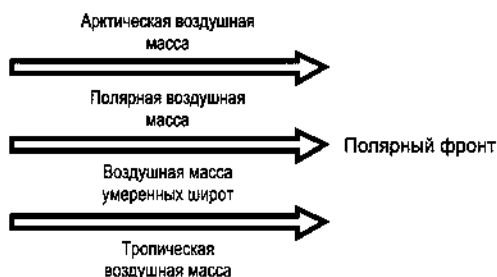


Рис. 2.1. Расположение воздушных масс и полярного фронта.

Горизонтальная однородность воздушных масс может нарушаться явлениями перемешивания. В результате можно рассматривать каждую воздушную массу как однородное «тело», имеющее собственную температуру, параметры движения, относительную влажность, природу облакообразования и прочие признаки.

В ряде случаев граница между воздушными массами выражена четко, так что на приземных синоптических картах можно провести линию раздела двух воздушных масс, называемую линией атмосферного фронта, а на спутниковых изображениях увидеть определенную структуру поля облачности. В вертикальной плоскости сечении переходной зоны соответствует фронтальный слой, который располагается наклонно, а длина поверхности переходной (фронтальной) зоны может измеряться тысячами километров в соответствии с горизонтальной протяженностью воздушных масс, которые она разделяет. В целях упрощения можно рассматривать его как наклонную фронтальную поверхность. Отсутствие изменений температуры воздушной массы свидетельствует о том, что она полностью сформировалась. Воздушная масса как целостное образование под влиянием атмосферной циркуляции смещается из очага формирования в смежные районы, взаимодействуя на пути перемещения с соседними воздушными массами, свойства которых могут существенно отличаться.

При перемещении воздушная масса непрерывно трансформируется и изменяет свои свойства вследствие контакта с подстилающей поверхностью и под влиянием изменившихся условий радиационного баланса. Трансформация продолжается до тех пор, пока воздушная масса в новом месте ее расположения не достигнет температуры равновесия — это означает, что сформировалась воздушная масса с новыми свойствами.

Таким образом, формирования воздушной массы происходит непрерывно в любом географическом районе при любых условиях атмосферной циркуляции.

По соседству друг с другом одновременно могут находиться по меньшей мере две воздушные массы, обладающие разными свойствами, определяющими различные условия образования облачных полей.

Известно, что температура поднимающейся до уровня конденсации частицы воздуха изменяется по сухоадиабатическому закону, при котором она охлаждается на 1°C при подъеме на 100 м, если отсутствует обмен теплом с окружающим воздухом. Выше уровня конденсации охлаждение происходит медленнее — по влажной адиабате. За счет силы Архимеда более теплая и легкая частица воздуха будет подниматься и одновременно охлаждаться до тех пор, пока не будет достигнута верхняя граница слоя конвекции, где температура частицы примерно равна температуре среды.

При одной и той же начальной разности температуры частицы и среды и при одном и том же значении градиента температуры в окружающем воздухе частица поднимется на меньшую высоту, если не будет достигнуто насыщение, и на большую высоту, если подъем происходит при условии насыщения водяного пара. Отсюда следует, что при одних и тех же условиях более влажная воздушная масса будет и более неустойчивой. Иными словами, чем меньше высота уровня конденсации в воздушной массе, тем она неустойчивее при прочих равных условиях.

Наиболее ярко неустойчивость воздушной массы проявляется при образовании мощных кучево-дождевых облаков (Cb) в процесс развития гроз и шквалов. Неустойчивость зависит не только от градиента температуры и влажности воздушной массы, но и от следующих факторов:

- состояния подстилающей поверхности и прилегающего к ней приземного слоя воздуха;
- рельефа местности;
- наличия сплошного слоя облаков, препятствующих прогреванию подстилающей поверхности и возникновению конвективных движений;
- характеристик ветра и т. п.

При отсутствии конвекции в теплой воздушной массе могут образовываться только слоистые формы облаков за исключением летнего сезона над сушей. В таких облаках появление просветов и «окон» исключено. Это видно на изображении поля облаков теплого сектора атмосферного циклона, приведенном на рис. 2.2, где четко выделяется облачный щит слоистой облачности.

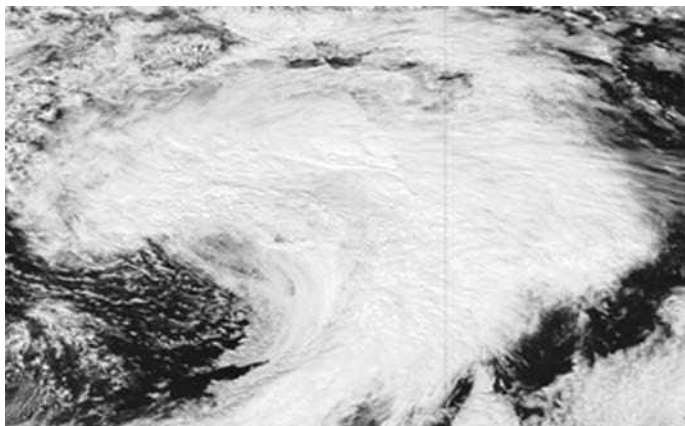


Рис. 2.2. Поле облаков теплого сектора атмосферного циклона.

Скачок плотности, в свою очередь, вместе с наклоном фронта определяет динамическую значимость фронта.

Угол наклона фронтальной поверхности к плоскости Земли (α) описывается известной формулой Моргулиса:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{g} \cdot \frac{v_2 \rho_2 - v_1 \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} = \frac{l}{g} \cdot \frac{T_1 v_2 - T_2 v_1}{T_1 - T_2},$$

где v_1 , ρ_1 , T_1 — скорость, плотность и температура теплой воздушной массы; v_2 , ρ_2 , T_2 — те же характеристики холодной воздушной массы.

Угол наклона фронтальной поверхности не превышает одного градуса.

Расположение фронтальных поверхностей при развитии циклона показано на рис. 2.3, на котором изображены гипотетическая диспозиция воздушных масс в стационарном циклоне (*a*), деформация фронтов при перемещении циклона (*b*), трехмерное изображение фронтальных поверхностей (*в*).

Фронты рассматриваются, прежде всего, как плоские и наклонные поверхности раздела между двумя воздушными массами различной плотности. Холодный (и, следовательно, более плотный) воздух всегда располагается клином с острым углом α между поверхностью раздела и поверхностью Земли (см. рис 2.3 *a*).

Так, теплый фронт представляет собой наклонную поверхность раздела между двумя воздушными массами со значительной разностью температур, при движении вдоль которой более теплая воздушная масса замещает более холодную.

Указанное замещение происходит таким образом, что теплая воздушная масса скользит вдоль теплого фронта вверх, образуя характерную облачную систему: сначала C_i — C_s , а затем A_s — N_s , из которых выпадают непрерывные и все усиливающиеся осадки. При прохождении фронта

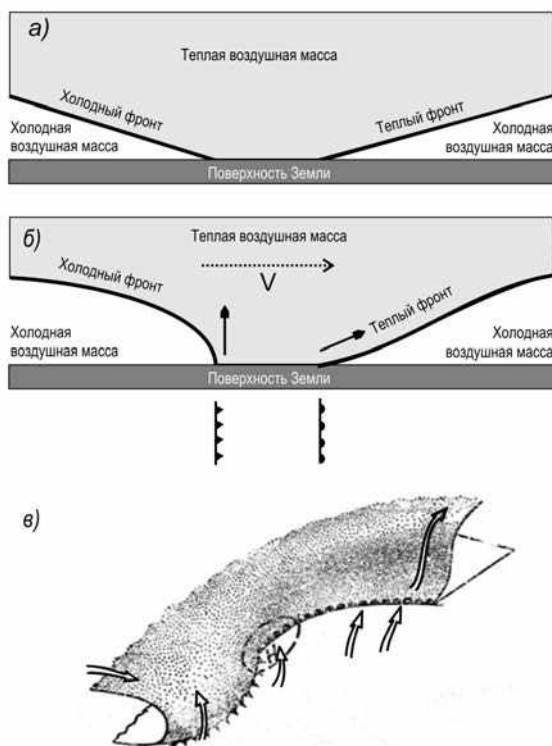


Рис. 2.3. Расположение фронтальных поверхностей при развитии циклона.

у поверхности Земли происходит повышение температуры и увеличение влажности, прекращение обложных осадков и переход системы As — Ns в систему низких слоистообразных облаков или туман.

Холодный фронт является поверхностью раздела, вдоль которой более холодная масса замещает более теплую.

При перемещении циклона с некоторой скоростью V вследствие трения воздушных масс о земную поверхность их нижние слои будут отставать в своем движении от расположенных выше воздушных масс (см. рис. 2.3 б). Вследствие приземного трения профили фронтальных поверхностей по прошествии некоторого времени деформируются и принимают вид, показанный на рис. 2.3 б и в.

В случае холодного фронта фронтальная поверхность будет наклонена под большим углом, а в случае теплого фронта угол наклона существенно меньше.

Таким образом, в нижних слоях тропосферы, где трение всегда значительно, должно существовать принципиальное и динамически важное различие между положением холодного и теплого фронтов.

Рассмотрим далее детально структуру атмосферных фронтов.

2.1.2. СТРУКТУРА ХОЛОДНОГО ФРОНТА

Холодные атмосферные фронты по своей структуре подразделяются на холодные фронты первого рода (анафронт) и холодные фронты второго рода (катафронт). Сначала рассмотрим особенности холодного фронта первого рода — такой холодный фронт, где над всей фронтальной поверхностью преобладает восходящее скольжение теплого воздуха (рис. 2.4).

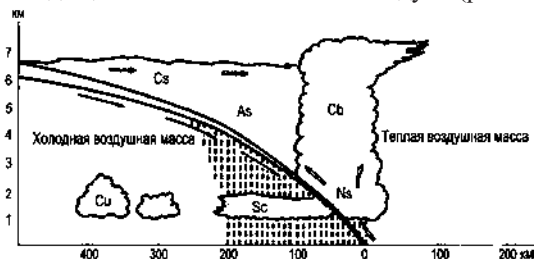


Рис. 2.4. Структура холодного фронта первого рода (анафронт).

Холодный фронт как поверхность плавного восходящего скольжения (анафронт) теплой воздушной массы должен был бы при отсутствии трения иметь точно такие же свойства в отношении системы конденсации, распределения ветра и т. д., как и обычный теплый фронт, также являющийся поверхностью восходящего скольжения. Разница была бы только в том, что все явления при прохождении холодного фронта следовали бы в обратном порядке. Однако, как было указано ранее, вследствие трения о земную поверхность, профиль обоих типов этих фронтов очень быстро видоизменяется (см. рис. 2.3 б и в). Поверхность холодного фронта становится в приземной части круче и будет при вторжении в теплую воздушную массу направлять восходящее скольжение теплого воздуха круто вверх. Благодаря этому передняя часть облачной системы будет принимать известную форму запятой, на которой задняя часть облачного щита будет размытой (рис. 2.5).

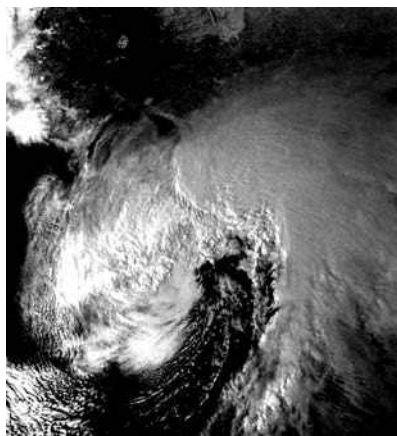


Рис. 2.5. Поле облачности в виде запятой (Comma).

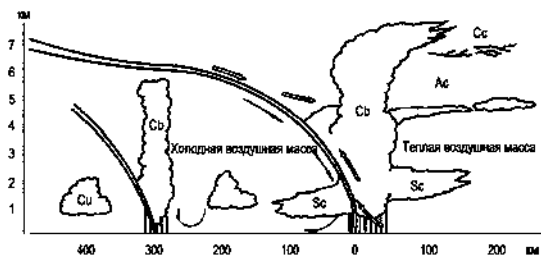


Рис. 2.6. Структура холодного фронта второго рода (катафронт).

Поверхность холодного фронта уже в нескольких километрах за холодным воздухом принимает нормальный угол наклона 1:100. За валом кучево-дождевых облаков с сильными шквалами и порывами ветра иногда следуют равномерные осадки из высокостроистых облаков.

Прохождение холодного фронта второго рода будет сопровождаться точно такими же явлениями, как и прохождение большого кучево-дождевого облака (рис. 2.6 и 2.7).

При прохождении всей облачной системы холодного фронта второго рода прекращение осадков происходит внезапно.

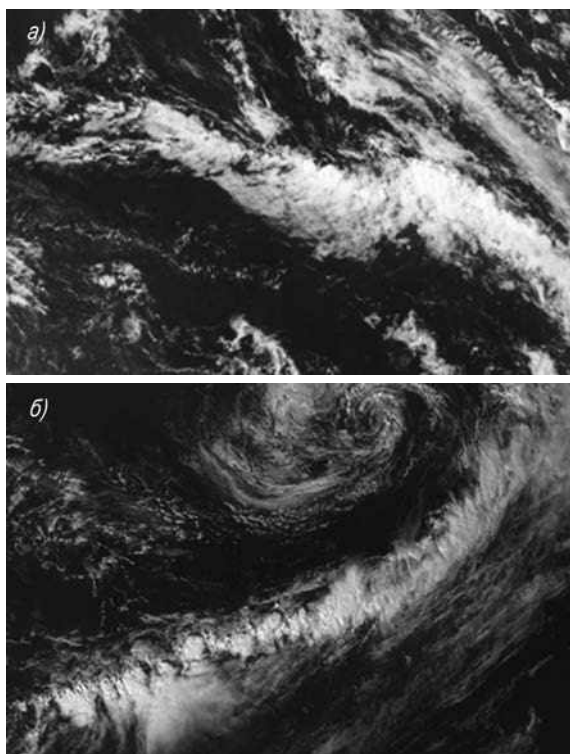


Рис. 2.7. Полоса кучевых облаков на холодном фронте.

Непосредственно перед холодным фронтом теплая воздушная масса, как уже было сказано, должна быстро двигаться вертикально вверх (см. рис. 2.3 в). Теплое течение сопровождается порывом ветра перед дождем в теплом воздухе, восходящим в узкой зоне перед холодным фронтом (частично уже увлажненным дождем). Высота уровня конденсации при этом будет минимальной (рис. 2.7).

2.1.3. ПРЕДФРОНТАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Так же как и теплый фронт, холодный фронт характеризуется рядом предфронтальных явлений, которые могут служить его признаками.

В области циклона в предфронтальном теплом воздухе все эффекты способствуют облакообразованию, в то время как непосредственно за фронтом в холодном воздухе все способствует размыванию облаков. Вся область осадков холодного фронта будет предфронтальной.

Восходящее движение теплого воздуха в циклоне, в принципе, такое же, что и в приземной части теплого воздуха у холодного фронта второго рода. В этом случае теплый воздух поднимается не так круто и будет возникать только плотный облачный вал, когда восходящий поток, не встречая никакого препятствия над клином холодного воздуха, будет в основном скользить вверх вдоль поверхности холодного фронта. При этом он достигнет границы образования ледяных ядер и сформирует такую же систему ($C_s - A_s - N_s$), как в случае прохождения теплого фронта. То небольшое количество облаков, которое будет распространяться в противоположном направлении, будет быстро размываться. Яркостные отличия будут наблюдаться на изображениях, характерных для холодных ана- и катафронтов, как показано на рис. 2.8. Поэтому настоящие предфронтальные осадки будут отсутствовать, а предфронтальный облачный вал будет состоять из кучевых облаков.

В холодном фронте первого рода движения воздуха внутри холодной воздушной массы являются нисходящими. В холодном фронте второго рода эти движения максимально развиты у крутого склона фронтальной поверхности. Но в случае холодного фронта первого рода картина иная, поскольку клин холодного воздуха почти не движется вперед. Нисходящий поток распределен практически по всему клину холодного воздуха, что со-

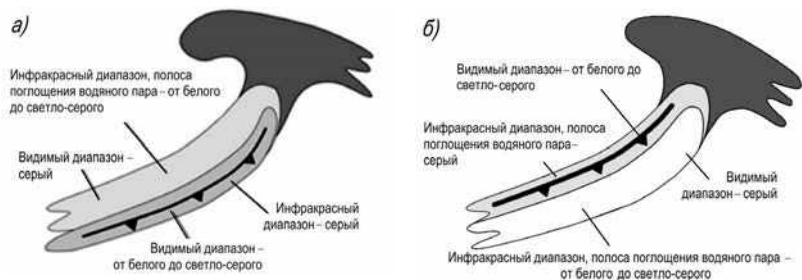


Рис. 2.8. Тональная схема формирования облачности холодного фронта.

а — холодный анафронт (фронт первого рода), б — холодный катафронт (фронт второго рода).

ответствует уменьшению скорости ветра в холодном воздухе при приближении к холодному фронту. Благодаря малой интенсивности нисходящего движения в передней части холодного воздуха, кучевые облака практически не образуются и зафронтального порыва ветра не возникает.

На спутниковых снимках холодные фронты выглядят как циклонически изогнутые облачные полосы синоптического масштаба, разделяющиеся на две подгруппы: анафронты и катафронты. На спутниковых снимках они имеют различную структуру.

Сверху облака холодного анафронта выглядят как ровная сплошная облачность. На изображениях в видимом участке спектра излучения самая яркая область располагается от передней кромки до средней части облачной полосы, что указывает на наличие внизу насыщенных влагой облаков, простирающихся от нижней границы облаков до середины тропосферы. На изображениях, полученных в инфракрасном диапазоне, и снимках, полученных в полосе поглощения водяного пара, самая яркая область простирается от заднего края до средней части полосы облаков, что указывает на холодные и высокие вершины облаков в задней части фронтальной системы, часто со встроенными кучево-дождевыми облаками.

Перед полосой облаков и позади нее располагаются безоблачные участки.

На изображениях холодного катафронта, полученных в полосе поглощения водяного пара, самая яркая область находится в районе от заднего края до средней части полосы облаков. На снимках облачность ана- и катафронтов различить удастся не всегда. Во время раннего развития передняя часть фронта обычно относится к анатипу, а позже становится кататипом. Эти два типа также могут существовать в рамках одной фронтальной поверхности. В этих случаях черты анафронта могут быть обнаружены вблизи точки окклюзии, тогда как структуры катафронта преобладают в более удаленных районах. Тыловые части облачной полосы образованы высотным воздушным потоком, начинающимся за холодным фронтом.

Основным физическим процессом развития холодных фронтов является движение холодного воздуха против теплого. Теплый воздух поднимается вдоль границы раздела, а холодный опускается ниже нее (см. рис. 2.4 и 2.6). При достаточной влажности в восходящем потоке воздух конденсируется и происходит образование облаков и осадков.

Согласно волновой теории, холодный анафронт характеризуется быстрым движением холодного воздуха против теплого, создающим конвергенцию в бароклинной зоне между двумя воздушными массами. Подъем теплого влажного воздуха вдоль фронтальной поверхности холодного фронта приводит к формированию полос облаков вдоль наклоненной в направлении назад (от направления движения) фронтальной поверхности. На приземной карте погоды основная зона облачности и осадков расположена за приземным фронтом.

Пример одновременно полученных изображений облачности холодного анафронта в различных диапазонах спектра излучения приведен на рис.2.9.

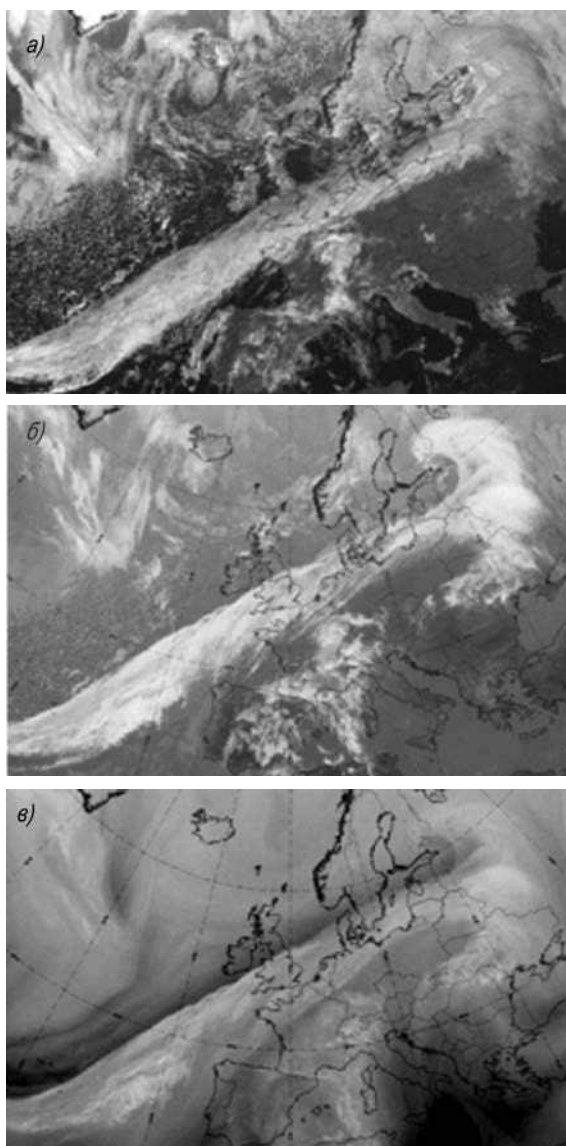


Рис. 2.9. Изображение облачности холодного анафронта в различных диапазонах спектра излучения — видимом (а), инфракрасном (б) и в полосе поглощения водяного пара (в).

Изображение структуры облачного поля холодного катафронта приведено на рис. 2.10. На снимках видно, как заток холодного воздуха в тыл циклона формирует область закрытых конвективных ячеек, наблюдаемых в видимом и инфракрасном диапазонах.

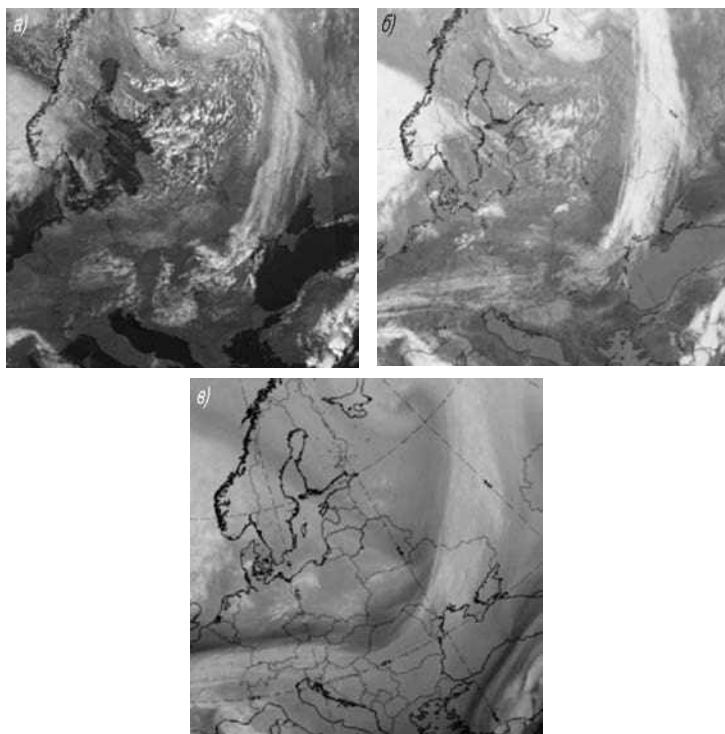


Рис. 2.10. Изображение облачности холодного катафронта в различных диапазонах спектра излучения — видимом (а), инфракрасном (б) и в полосе поглощения водяного пара (в).

2.1.4. СТРУКТУРА ТЕПЛОГО ФРОНТА

Структура типичного теплого фронта приведена на рис. 2.11. Облачная система теплого фронта (Ci — Cs — As — Ns) на всем своем протяжении формирует полосы падения осадков. Зачастую осадки из Cs и отчасти из As испаряются, не достигая поверхности Земли, и образуют полосы падения.

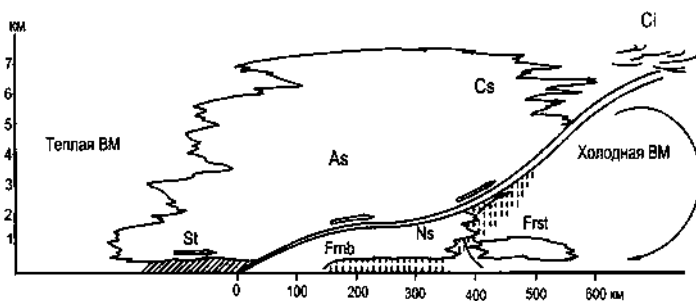


Рис. 2.11. Структура теплого фронта.

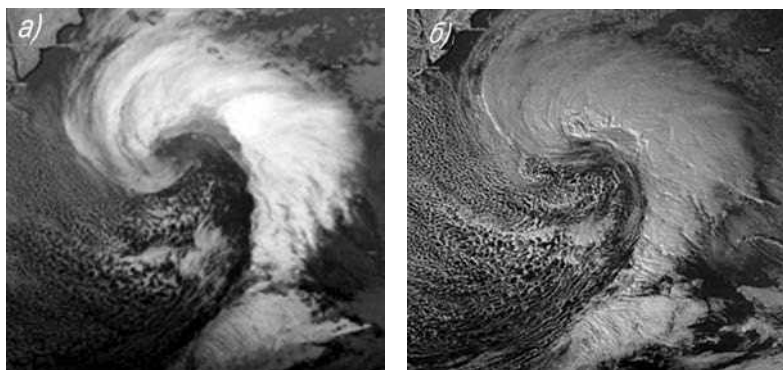


Рис. 2.12. Примеры изображений облачной полосы теплого фронта в инфракрасном (а) и видимом (б) диапазоне.

Можно отметить, что система облаков теплого фронта располагается преимущественно перед приземной линией фронта вдоль клина холодной воздушной массы (рис. 2.12), что соответствует зоне наиболее интенсивных восходящих движений теплого воздуха. Основными составляющими данной облачной системы являются две подсистемы, формирующиеся в холодной (Frst — Ns — Frnb) и теплой (Ci — Cs — As — St) воздушных массах.

Перистые облака (Ci) теплого фронта чаще всего представляют собой самостоятельный слой, верхняя граница которого совпадает с уровнем максимальной скорости ветра (в том числе струйного течения), т. е. располагаются около тропопаузы.

Поскольку верхняя граница облаков As — Ns расположена почти горизонтально, наибольшая толщина их слоя наблюдается вблизи линии теплого фронта.

Вблизи центра циклона, где система облаков теплого фронта имеет наибольшее развитие, ширина зоны Ns составляет около 300 км, а ширина всей системы As — Ns равна 500—600 км. Зона облаков Ci располагается перед системой As — Ns, ширина ее составляет примерно 200—300 км. Таким образом, в целом система облаков простирается перед линией теплого фронта на расстояние 700—900 км при ширине зоны обложных осадков из Ns около 300 км.

По мере удаления от центра циклона вдоль линии теплого фронта восходящие движения воздуха ослабевают. Соответственно ослабевают процессы облакообразования и образования осадков. На некотором расстоянии от центра циклона осадки у теплого фронта прекращаются, а затем исчезают и облака.

Летом над материками теплые фронты обычно существенно отличаются от типичной схемы. Перед фронтом облака часто не располагаются сплошным слоем: наблюдаются As, в дневные часы развиваются Ci, а вблизи центра циклона иногда и Sb, которые сопровождаются выпадением ливневых осадков и даже грозами.

В случае теплого фронта теплый влажный воздух движется против более холодного сухого воздуха. На границе воздушных масс теплый воздух скользит вверх по клину более холодного воздуха. Этот процесс создает фронтальную полосу облаков, сформированную в основном перед приземным фронтом (см. рис. 2.12).

Теплый фронт, как правило, хорошо выражен в поле облачности лишь в начальных стадиях развития циклона, поэтому его распознавание на снимках гораздо сложнее, чем холодного фронта. Изображение облачности теплового фронта на снимках, полученных в видимом диапазоне спектра излучения, отличается большим разнообразием рисунков облачного покрова.

Наиболее типичной для теплового фронта является облачная зона характерного строения в виде полос шириной 300—500 км и длиной от нескольких сотен до тысячи километров, но длинные облачные полосы на теплых фронтах встречаются редко. Эти полосы в процессе окклюдирования сливаются с облаками холодного фронта. Обычно облачная зона на теплом фронте размывается и на снимках бывает виден лишь незначительный выступ у точки окклюзии, соответствующий ранее существовавшей облачной полосе теплового фронта. В то же время холодный фронт остается четко выраженным.

В начальный период использования снимков, полученных с ИСЗ для оперативных нужд, считалось, что облачная зона теплового фронта иногда имеет антициклоническую кривизну и выгибается в сторону холодного воздуха. На снимке, приведенном на рис. 2.13, она обозначена буквой А. Однако найти однозначную причину такого поведения воздушной массы в начале шестидесятых годов прошлого века не смогли. В разделе о циркуляционном диполе будет показано, что антициклоническая циркуляция, вероятнее всего, связана с формированием смежного с циклоном антициклона.

Почасовые изображения поля облачности атмосферного циклона, полученные в инфракрасном диапазоне спектра, приведены на рис. 2.14, где видно изменение структуры поля облачности при трансформации средне-

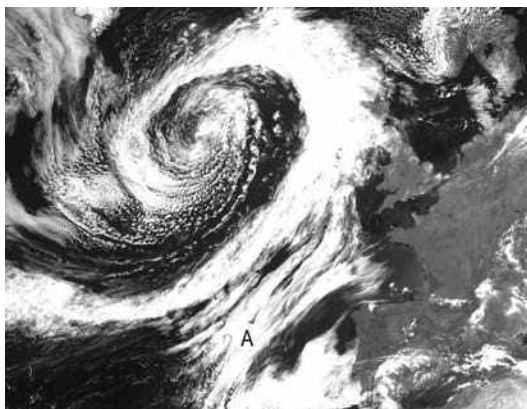
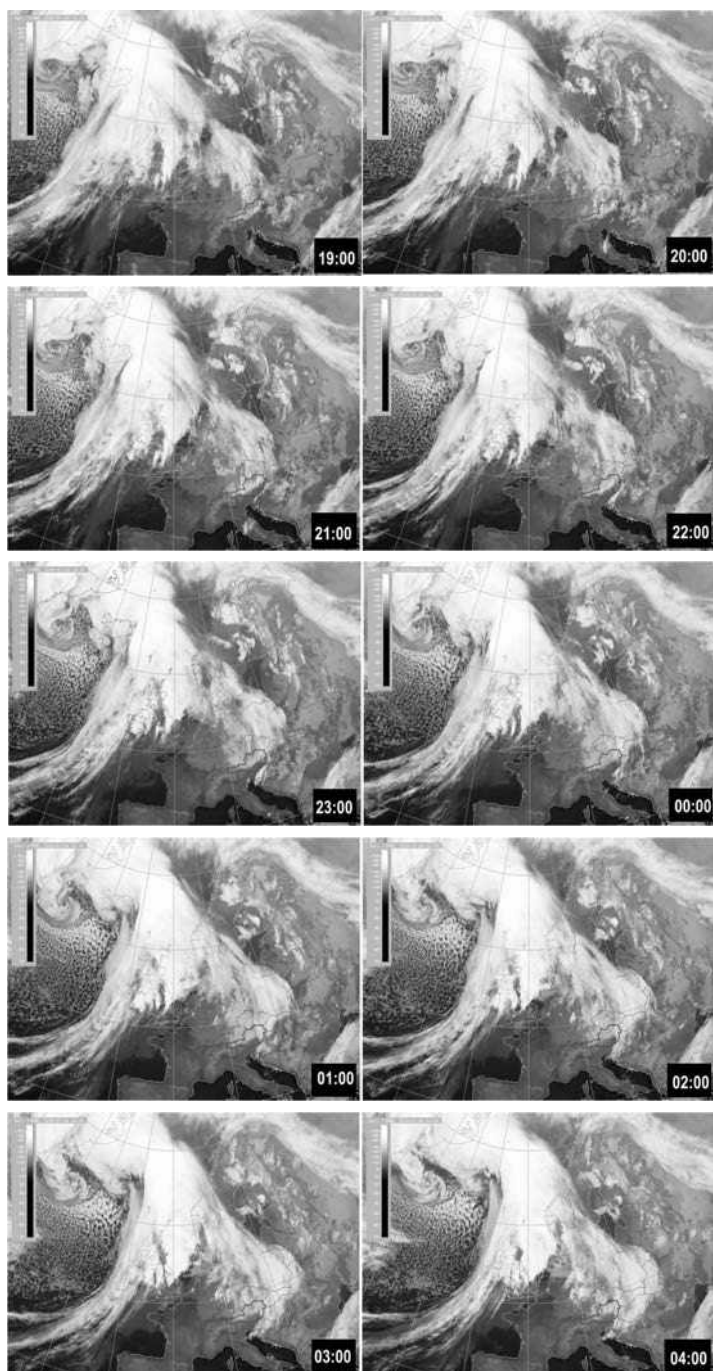


Рис. 2.13. Изображение области антициклонической циркуляции в циклоне.



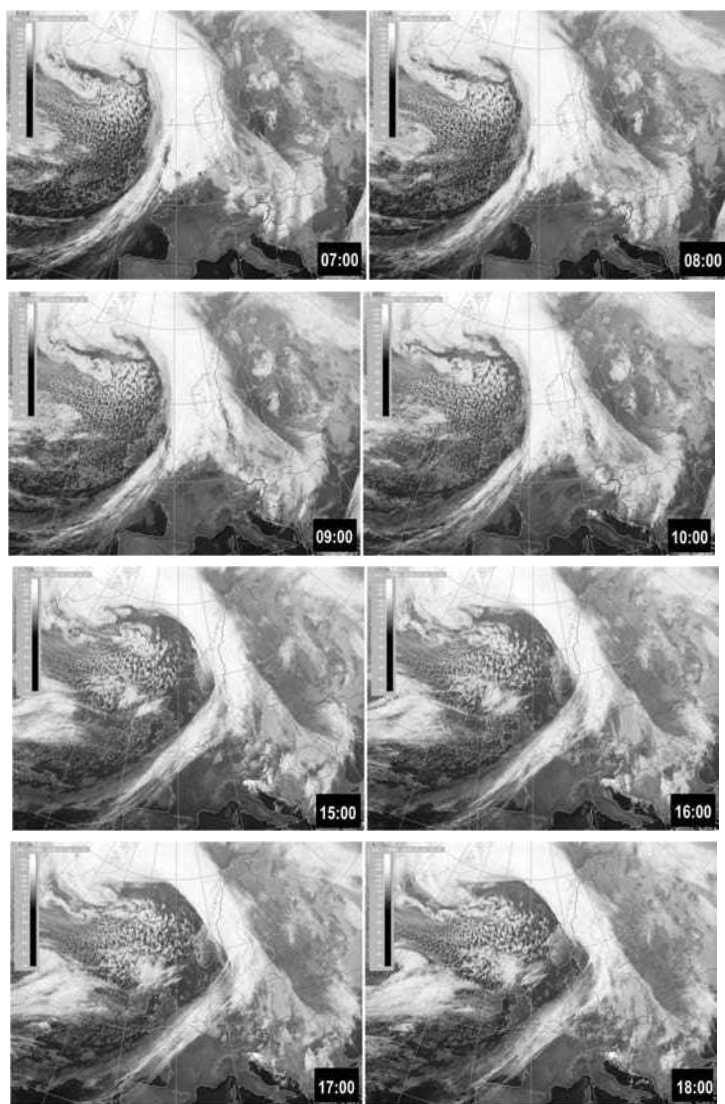


Рис. 2.14. Почасовая съемка трансформации атмосферного среднеширотного фронтального циклона.

широтного циклона. Серия снимков дает возможность рассмотреть трансформацию теплового и холодного фронтов.

Облачная полоса теплового фронта сформирована из однородной слоисто-дождевой облачности. На снимках, полученных в летнее время, часто могут наблюдаться отдельные образования кучево-дождевых облаков (рис. 2.15). Там, где происходит развитие волны и циклона, облачная полоса расширена, а в области тыловых гребней (см. рис. 2.15 *а* и *б*) сужена и размыта. Размытые теплые фронты иногда бывают видны на снимках в виде полос перистой облачности. Отличительной чертой облачности теплового фронта является резкая, часто с округлыми очертаниями ее тыловая граница и изрезанная передняя граница (см. рис. 2.15 *а* и *б*), где отдельные облачные валы и удлиненные просветы располагаются параллельно основной облачной полосе.

Перед облачной зоной теплового фронта в холодном воздухе могут наблюдаться мелкие, беспорядочно разбросанные облака кучевых форм, а за

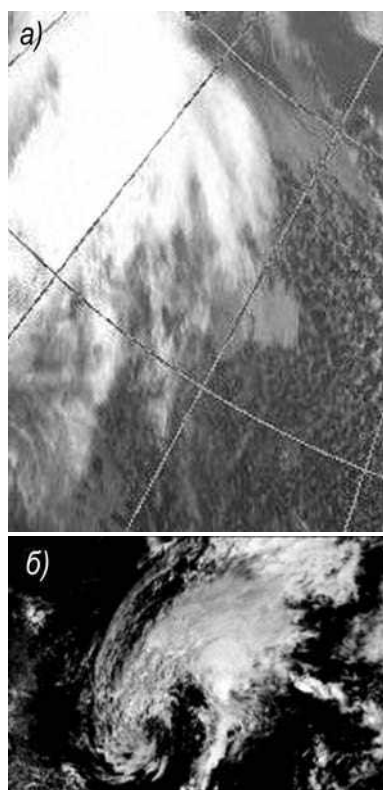


Рис. 2.15. Изображение облачности теплового фронта.

а) изображение со средним разрешением, *б)* изображение облачности теплового фронта в структуре циклона.

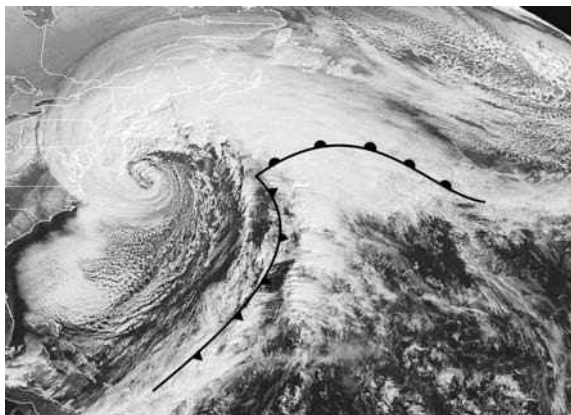


Рис. 2.16. Расположение атмосферных фронтов на изображении поля облачности атмосферного циклона.

фронтом в теплом секторе — конвективные облака. Такая ситуация характерна в основном для летнего времени, что свидетельствует о неустойчивости и высоком влагосодержании теплого воздуха. Исследования также показали, что положение облачной полосы теплого фронта обычно хорошо согласуется с положением приземной ложбины в поле давления. При этом линия фронта у поверхности Земли располагается вблизи внутреннего края облачной полосы (рис. 2.16).

2.2. ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ АТМОСФЕРНОГО ЦИКЛОНА

Полный цикл эволюции циклона по волновой модели — от возникновения слабого волнового возмущения на поверхности раздела теплой и холодной воздушных масс — до его заполнения показан на рис. 2.17, где представлены следующие стадии:

- I стадия — волна на полярном фронте,
- II стадия — молодой циклон,
- III стадия — развитый циклон,
- IV стадия — окклюзия.

В целях упрощения будем рассматривать процессы в слое атмосферы толщиной 500 гПа как репрезентативном для средней тропосферы. Изло-

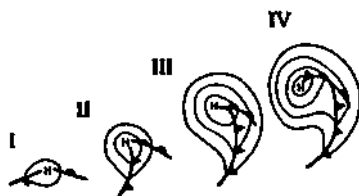


Рис. 2.17. Стадии развития внетропического циклона по норвежской модели жизненного цикла.

жение модели жизненного цикла атмосферных циклонов мы будем вести с учетом знаний, полученных в период начиная с пятидесятих годов прошлого века до настоящего времени. За этот срок произошло значительное развитие дистанционного зондирования, в том числе увеличение пространственного разрешения бортовой аппаратуры, что дало возможность изучить мезоструктуру облачного покрова.

2.2.1. СТАДИЯ ВОЛНЫ НА ПОЛЯРНОМ ФРОНТЕ

Развитие циклона начинается с не всегда прослеживаемой на снимках облаков, полученных с ИСЗ, изображения «стадии волны». Форма облачности, характерной для этой стадии, — искривление у вершины волны в сторону холодного воздуха (виден изгиб полосы облаков), когда облачный массив расширяется. Это видно на схеме строения волны (рис. 2.18 *а*), где заштрихованная область соответствует зоне приземных осадков, а область, ограниченная волнистой линией, — полю облачности. На рис. 2.18 приведены примеры изображения облачного поля стадии волны. Специалисты в области анализа спутниковой информации сходятся во мнении относительно того, что первоначально зарождающийся циклонический вихрь состоит из облаков слоистых форм и лишь впоследствии в нем появляются кучевообразные облака.

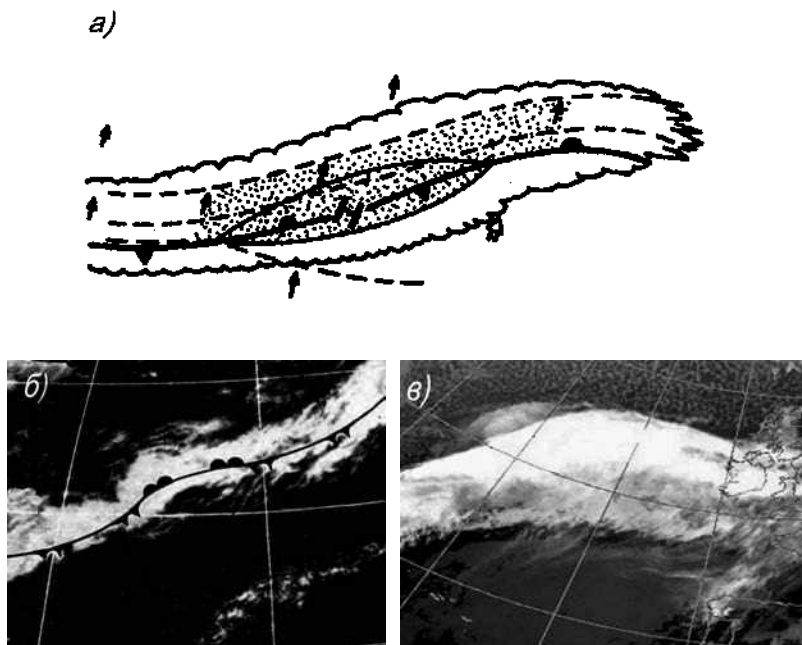


Рис. 2.18. I стадия — волна на полярном фронте.

а — схематическое расположение фронта в поле облачности и осадков,
б и *в* — изображения волны в поле облачности.

При образовании волнового возмущения облачная полоса, соответствующая фронту, расширяется и несколько искривляется у вершины волны. Наиболее мощная (на снимках светлая) облачность располагается непосредственно над вершиной волны, где наблюдаются наиболее интенсивные восходящие потоки воздуха. В холодной воздушной массе за сравнительно широкой полосой фронтальной облачности иногда можно наблюдать одну, две или несколько дугообразных облачных полос, как бы повторяющих искривление основной фронтальной полосы. Стадия волны на полярном фронте в поле облачности опознается не всегда. Зачастую понять, что в поле облачности наблюдается формирование атмосферного циклона, можно только на следующем этапе его развития — стадии молодого циклона.

2.2.2. СТАДИЯ МОЛОДОГО ЦИКЛОНА

На этой стадии происходит дальнейшее изменение конфигурации фронтальной облачной полосы. Если ее ориентация широтная и участок холодного фронта вместе с облачной системой прогибается к югу, а у вершины волны вытягивается к северу, то фронтальная облачная полоса начинает деформироваться (рис. 2.19 *а*). Наиболее мощная облачность по-прежнему расположена у вершины еще широкого теплого сектора, где преобладает малооблачная погода. Перед теплым фронтом (верхняя часть фото на рис. 2.19 *б*) могут быть заметны узкие гряды сравнительно более ярких облаков, ориентированных параллельно краю фронтальной облачности. Такие облачные гряды указывают на наличие более неустойчивого воздуха.

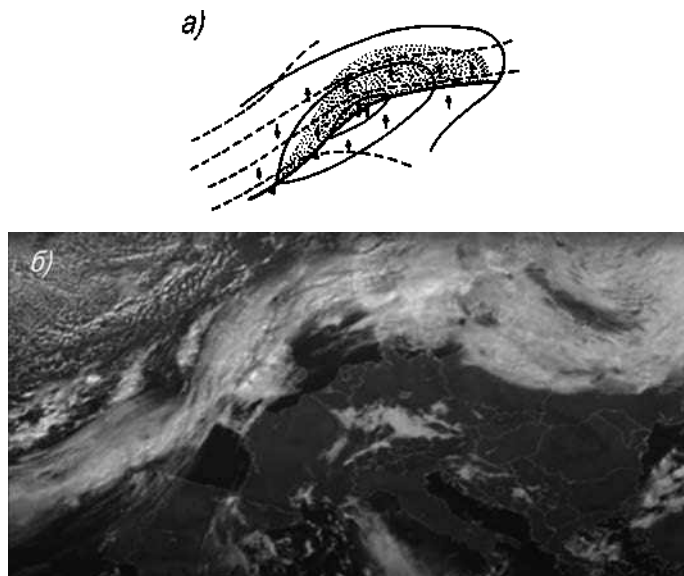


Рис. 2.19. Изображение поля облачности в стадии молодого циклона.
а) схема формирования поля облачности, *б*) поле облачности молодого циклона.

Облака кучевых форм в передней части возникающего циклона могут быть объединены в ячейки.

Через непродолжительное время в поле облачности развивающегося циклона начинает прослеживаться заметная структурная ориентация — появляются два четко выраженных прогиба в облачной системе (см. рис. 2.19 б). У самой вершины волны прогиб направлен в сторону холодного воздуха, т. е. он имеет антициклоническую кривизну (участок будущего теплого фронта), несколько ниже вершины волны (в образующемся холодном фронте) — в сторону воздуха теплого (в сторону формирующегося теплого сектора), т. е. прогиб имеет циклоническую кривизну.

Данная стадия длится не более одних суток (обычно 12 часов). При неустойчивости фронтальной волны она принимает характер молодого циклона. В этом случае теплый фронт все более продвигается в сторону холодной воздушной массы, а холодный фронт продолжает смещаться в сторону теплой. Таким образом, на данной стадии развития циклона в нем оформляется хорошо выраженный теплый сектор, заполненный теплым воздухом и отделенный от остальной, холодной части циклона спереди теплым, а сзади холодным фронтом. Циклоническая циркуляция в области молодого циклона выражена довольно четко.

Центр молодого циклона совпадает с вершиной теплого сектора. В этой стадии в системе циклона отмечаются наибольшие значения скорости ветра и облачный массив приобретает вихревую структуру. В передней части молодого циклона наблюдаются облака и осадки теплого фронта, в теплом секторе — туманы, слоистые облака, морось, за холодным фронтом — характерная для последнего облачность, а затем облака и осадки конвективного происхождения, свойственные неустойчивой воздушной массе тыла циклона. Фронтальная облачная полоса продолжает деформироваться. При ее широтном расположении участок холодного фронта вместе с облачной системой прогибается к югу, а у вершины волны вытягивается к северу.

Облачность молодого циклона имеет полосное строение, причем полосы спирально сходятся к точке, образуя облачный вихрь.

В молодом циклоне можно выделить три зоны, резко различающиеся по условиям погоды (рис. 2.20 а).

I зона — передняя и центральная части холодного сектора циклона перед теплым фронтом. В этой зоне характер погоды определяется свойствами теплого фронта. Чем ближе к центру циклона и к линии фронта, тем мощнее система облаков и тем вероятнее выпадение обложных осадков.

II зона — тыловая часть холодного сектора циклона за холодным фронтом. Здесь погода определяется свойствами холодной воздушной массы. При достаточной влажности и значительной неустойчивости в этой зоне выпадают ливневые осадки. III зона — теплый сектор между теплым и холодным фронтом.

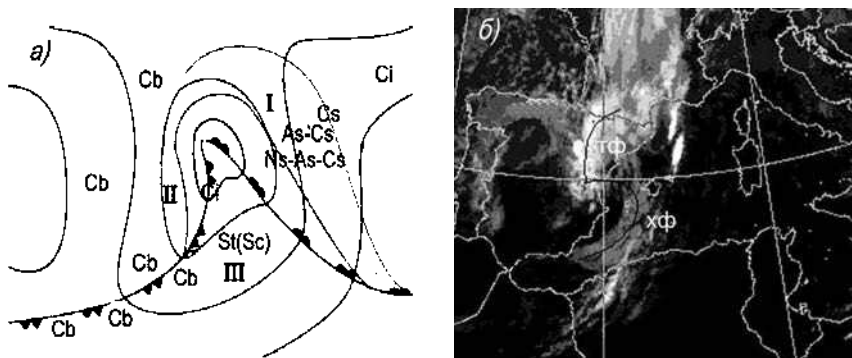


Рис.2.20. Воздушные массы молодого циклона.

а) схема расположения, б) инфракрасное изображение.

Зимой в теплом секторе молодого циклона отмечается сплошной облачный покров, состоящий из облаков St и Sc, а иногда наблюдаются адвективные туманы и изморозь. Летом в теплом секторе циклона в зависимости от влажности воздушной массы может наблюдаться как малооблачная, так и облачная погода, даже возможны грозы. Днем отмечаются преимущественно кучевые облака.

В стадии молодого циклона наиболее мощная облачность наблюдается у вершины широкого теплого сектора. В теплом секторе циклона преобладает малооблачная погода. Иногда перед теплым фронтом могут появиться узкие гряды сравнительно более ярких облаков, которые ориентированы параллельно краю фронтальной облачности. Эти гряды свидетельствуют о наличии более неустойчивого воздуха перед теплым фронтом, в котором летом могут развиваться кучевообразные облака. В отдельных случаях завихренность облачности в молодом циклоне прослеживается довольно слабо. Поскольку стадия молодого циклона длится недолго, эту облачную систему не всегда удастся зафиксировать со спутника.

Известно, что стадия молодого циклона характеризуется наличием на картах приземного анализа двух-трех замкнутых изобар и четко выраженной циклонической циркуляцией в нижних слоях тропосферы.

2.2.3. СТАДИЯ РАЗВИТОГО ЦИКЛОНА

На этой стадии циклон у поверхности Земли достигает наибольшей глубины, после чего начинается его заполнение. Длительность стадии составляет от 12 часов до одних суток. Облачная система циклона значительно трансформируется, что отражается в существенных и быстрых изменениях в ее структуре: она приобретает резко выраженную спиралевидную форму. В центральной части происходит смыкание облачных спиралей, связанных с теплым и холодным фронтами, в единую спираль с мощной облачной закручивающуюся системой. В это время происходит смыкание теплого и холодного фронтов — окклюдирование циклона. Теплый сектор циклона

значительно уменьшается, а смыкание облачных спиралей холодного и теплого фронтов приводит к образованию единой спирали фронта окклюзии.

Процесс смыкания фронтов начинается в центре циклона и постепенно сдвигается к периферии (этот процесс иногда сравнивают с работой застёжки-молнии). Если процесс окклюдирования протекает быстро, тёплый воздух из тёплого сектора циклона активно вытесняется вверх, его температура быстро сравнивается с температурой холодного воздуха. В этих случаях точка окклюзии расположена под струйным течением и сохраняется значительный температурный контраст. В облачном поле признаком быстрого окклюдирования является так называемое «отсечение» центральной части облачного вихря облачностью струйного течения. В области точки окклюдирования сохраняется высокая плотная облачность, северный край которой резко очерчен (рис. 2.21).

Признаком начинающегося циклогенеза у точки окклюзии служит появление выбросов перистых облаков вдоль северного края облачности. Наибольшая облачность в циклоне наблюдается у вершины тёплого сектора (рис. 2.22).

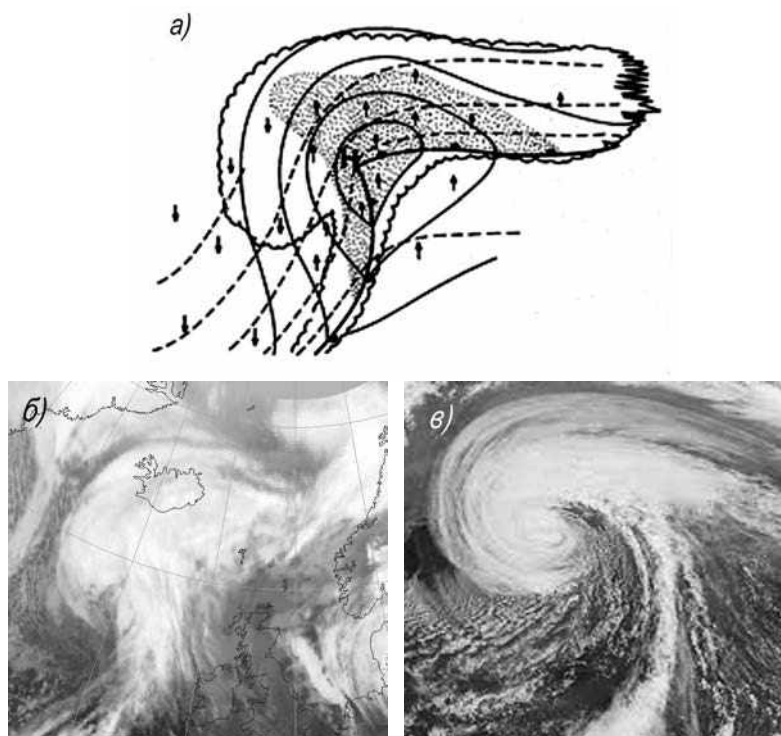


Рис. 2.21. Изображение облачности развитого циклона.

а) схема расположения облачности и зон осадков; б) изображение начала окклюдирования, полученное в инфракрасном диапазоне; в) изображение, полученное в видимом диапазоне.



Рис. 2.22. Изображение окклюдированного циклона.

Буквой А обозначена точка окклюзии, в которой смыкаются холодный и теплый фронты.

В циклонах холодный воздух перемещается быстрее теплого, что обусловлено не только разностью значений коэффициента трения теплого и холодного воздуха о поверхность Земли, но и тем, что теплый воздух совершает движение с вертикальной составляющей, снижающей скорость его перемещения по горизонтали.

По разные стороны от теплого сектора облачные системы фронтов выражены по-разному: различаются и характер облачности, и период существования — теплый фронт существует более короткое время. Сохранение в течение более продолжительного времени холодных фронтов по сравнению с теплыми обязано интрузии (затоку) холодного воздуха в тыл циклона, что поддерживает контрасты между воздушными массами по обе стороны холодного фронта. К сожалению, природу интрузии волновая теория не вскрыла. Частично это удалось сделать в модели жизненного цикла циркуляционного диполя.

Холодный фронт в поле облачности выражен ярче, чем теплый, и на снимках имеет четкую структуру.

Быстро смещающийся холодный фронт представлен преимущественно облаками Сб, которые формируют облачные системы непосредственно перед

фронтом. Это связано с тем, что быстро наступающий холодный воздух не дает возможности тепловому воздуху сдвинуться по горизонтали. Не успевающий отодвинуться теплый воздух под напором холодного оказывается вытесненным вверх и порождает кучево-дождевые облака. Описанная ситуация наиболее характерна для лета, а в холодный период — для районов более низких широт или при смещении воздушных масс из более низких широт, а также при смене характера подстилающей поверхности под перемещающимся воздухом.

Параметры облаков холодного фронта зависят от интенсивности процесса адвекции холодного воздуха в тыл циклона. При достаточно слабой адвекции фронтальная облачная полоса как сплошная и широкая не формируется.

Степень подвижности холодного фронта может определяться по расположению его облачных систем и характеру облачного поля. Так, скорость холодного фронта уменьшается, если его облачная полоса принимает меридиональное расположение и становится почти прямолинейной (что соответствует случаям глубокой ложбины, в которой лежит фронт). Если фронт располагается параллельно изобарам, то он малоподвижен. Но если угол между изобарами и фронтом достаточно большой (близок к прямому углу), то фронт перемещается быстро. Таким образом, видимая скорость перемещения фронта связана с углом между ним и изобарами.

Также было замечено, что скорость перемещения холодного фронта связана с его кривизной: скорость перемещения тем больше, чем больше кривизна фронтальной облачной полосы. Если границы облачного массива не выражены четко или эти границы теряют четкость, то скорость перемещения холодного фронта невелика или снижается. Если массив облаков имеет выраженные границы за холодным фронтом, включая наличие прояснения за ним, то такой холодный фронт достаточно подвижен.

Объем и размеры облачных систем теплого фронта зависят от стадии развития циклона, а вдоль всей фронтальной облачной полосы происходит постоянное изменение ее ширины. Так, если у молодого циклона облачная система прослеживается на значительном расстоянии при большей ширине, то по мере развития этого образования фронтальный облачный массив сужается и укорачивается. Как показала практика, только в самом начале развития циклона теплый фронт имеет развитую фронтальную облачную полосу. Эта особенность отличает теплый фронт от холодного. Последний сохраняются дольше, поскольку затоки холодного воздуха за холодным фронтом (в тылу циклона) поддерживают контрасты температуры соприкасающихся разнородных воздушных масс.

Облачная система теплого фронта в холодное время выражена лучше, чем в теплое. В летнее время облачная система теплого фронта зачастую бывает расслоенной. В некоторых случаях на снимках облачности при прохождении теплого фронта система облаков совсем не наблюдается. Последний случай свидетельствует о том, что воздушная масса, совершающая восходящее движение, является не только очень теплой, но и относительно сухой. Вместе с тем

именно в летнее время, т. е. в период наиболее сильной конвекции, верхняя граница облачной системы облаков теплого фронта (если они сформировались) в преобладающем числе случаев выше, чем в холодное время.

Поскольку активность атмосферных фронтов в большой мере определяет интенсивность процесса облакообразования (связанную со скоростью восходящих движений), многие параметры облачных полей изменяются в зависимости от указанной активности. Наибольшая активность атмосферных фронтов прослеживается около центра циклона, где формируются широкие облачные полосы, соответствующие фронтам. При удалении от центра циклона в области его периферии фронтальные облачные полосы, как было указано выше, сужаются.

С удалением от центра циклона в зоне фронтов характер облачности меняется. На некотором расстоянии от центра циклона слоисто-дождевые облака (Ns) сменяются слоисто-кучевыми (Sc), а высокослоистые (As) — высококучевыми (Ac). При некотором удалении от центра циклона облака нижнего и даже среднего ярусов совсем не прослеживаются, а положение фронта обозначают лишь облака верхнего яруса.

Высококучевые облака (Ac), как и слоисто-кучевые (Sc), фронтальными облаками не являются, а трансформация в них фронтальных облаков свидетельствует об ослаблении интенсивности фронтальных процессов при удалении от центра циклона.

Система облаков активных холодных фронтов значительно ярче выражена и в числе, и в ширине облачных полос. Малоактивные холодные фронты выражены в полях облачности малым количеством облаков над сушей и узкими облачными полосами над водными поверхностями, причем эти полосы, как правило, сплошными не бывают.

В облачных системах как теплого фронта, так и медленно смещающегося холодного фронта облака Ns — As могут составлять единую облачную систему с облаками Cs, а могут быть отделены от них безоблачным слоем, что зависит от влажности воздуха и его температуры. В системах облаков теплого фронта их верхняя часть (Ci — Cs) чаще всего бывает самостоятельным слоем. Длительность стадии составляет от 12 часов до нескольких суток. Температура воздуха над тыловой и центральной частями циклона понижается. На стадии максимального развития в структуре облачной системы циклона происходят существенные и быстрые изменения. Она приобретает резко выраженную спиралевидную форму. В центральной части происходит смыкание облачных спиралей, связанных с теплым и холодным фронтами, в единую спираль с мощной облачной системой, закручивающуюся к центру высотного циклона (см. рис. 2.22).

Приземное поле давления в развитом циклоне характеризуется большим числом замкнутых изобар (рис. 2.23). Происходит смыкание теплого и холодного фронтов — начинается окклюдирование циклона. Его теплый сектор значительно уменьшается.



Рис. 2.23. Циклон в стадии максимального развития.

а) схема процесса, б) снимок в ИК диапазоне, в) снимок в видимом диапазоне.

2.2.4. СТАДИЯ ОККЛЮДИРОВАНИЯ ЦИКЛОНА

В метеорологии термин «окклюзия» относится к сложной структуре атмосферных фронтов, которая формируется, когда верхний холодный атмосферный фронт настигает нижний теплый атмосферный фронт и вытесняет его вверх. После окклюдирования циклон заполняется холодным воздухом и прекращает свое существование.

Характерным признаком циклона в стадии окклюдирования является то, что облачная полоса, связанная с теплым фронтом, деградирует полностью, от нее остается лишь небольшой выступ. Широкая облачная полоса — основная облачная спираль циклона — обычно соответствует фронту окклюзии, который переходит в холодный фронт.

Когда холодный фронт «догоняет» теплый, т. е. при окклюдировании циклона, в его облачных полях происходят заметные изменения. Действительно, с уменьшением температурных контрастов (теплый воздух, не успевая отодвигаться, вытесняется холодным воздухом холодного фронта вверх, оставляя на границах соприкосновения воздушных масс только холодный воздух с разными температурными характеристиками) происходит уменьшение скорости перемещения циклона, ослабевают конвективные процессы, поскольку циклон заполняется холодным воздухом. Строго говоря, теплый воздух в процессе окклюдирования циклона вытесняется не только в более высокие слои атмосферы, но и на переднюю периферию циклона.

Схема окклюдированного циклона приведена на рис. 2.24.

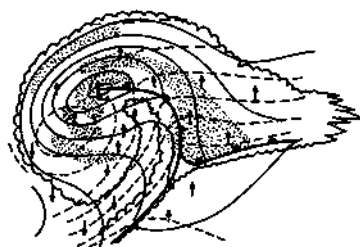


Рис. 2.24. Схема окклюдированного циклона.

В стадии окклюзии циклон пребывает достаточно продолжительное время по сравнению с другими его стадиями.

Типичный вид облачности фронта окклюзии приведен на рис. 2.25. В свое время гипотеза о процессе окклюдирования позволила заполнить недостающий этап в цепи жизненного цикла циклона. Она легко объяс-

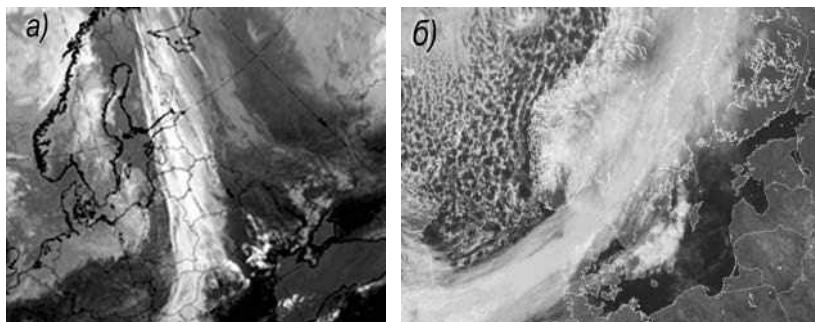


Рис. 2.25. Изображение фронта окклюзии над Скандинавией.

няет не только характер затухания циклона, поясняя ход динамико-термодинамического процесса, противоположный циклогенезу, — циклокатализ, образующий необходимые предпосылки прекращения циклогенеза.

Различают две системы облаков и осадков для двух мало различающихся видов окклюзии — теплого фронта окклюзии и холодного фронта окклюзии (рис. 2.26).

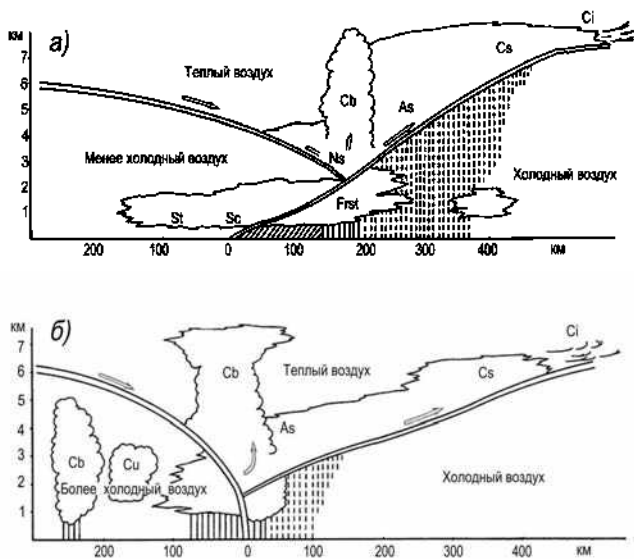


Рис. 2.26. Разновидности фронта окклюзии.

а) фронт окклюзии по типу теплого, б) фронт окклюзии по типу холодного.

Рассмотрим некоторые особенности строения фронта окклюзии.

Известно, что скорость ветра в циклоне достигает максимума непосредственно после начала окклюзии, когда циклон находится в стадии максимального развития. С этого момента фронт окклюзии соединяет в себе черты как теплого фронта, так и холодного.

Мы помним, что и холодный фронт может иметь достаточно сплошную и простирающуюся далеко вперед облачную систему, поэтому несложно понять, что различить тип фронта окклюзии бывает трудно. Кроме того, облачная система холодного фронта вблизи фронта окклюзии может закрывать облачную систему прежнего теплого фронта.

По мере дальнейшего заполнения циклона холодным воздухом его облачная система принимает вид все более отчетливо выраженного вихря. В этот период на снимках можно видеть, что облачная полоса совершила несколько (два-три) витков вокруг центра циклона и имеет форму спирали (рис. 2.27). Облачные витки четко отделяются друг от друга безоблачными промежутками. Эта особенность хорошо выражена над водной поверхно-

стью. Чем дальше от центра, тем на большем расстоянии находится один виток от другого, соответственно шире и зона малооблачной погоды.

На рис. 2.27 *а, б* и *в*, полученных в видимом диапазоне, зона малооблачной погоды выглядит как темная полоса, которая также спирально огибает центр циклона. Такой вид облачной спирали, состоящей из облаков слоистых форм, наблюдается в системе заполняющегося циклона, когда в нем еще есть теплый воздух. В процессе окклюдирования этот теплый воздух из передней части циклона заносится в его тыловую часть, в результате чего образуется узкий гребень тепла, огибающий циклон. В области теплого влажного воздуха вдоль указанного гребня и формируется облачная спираль.

В следующий период, когда в циклоне уже нет теплого воздуха и он полностью заполнен холодным воздухом, в его системе исчезает слоистая облачность. Вместо нее появляются разрозненные элементы и отдельные полосы, состоящие преимущественно из конвективных облаков, которые, однако, сохраняют форму вихря. По мере заполнения циклона эта облачность становится все менее и менее выраженной.

Нередко на снимках облачности в тылу окклюдированного циклона за фронтом наблюдается прерывистая спираль, состоящая из кучевообразных облаков. Эта спираль связана со вторичным фронтом (фронтами) и прослеживается в тыловой области вихря, являющегося основным в данной облачной системе.

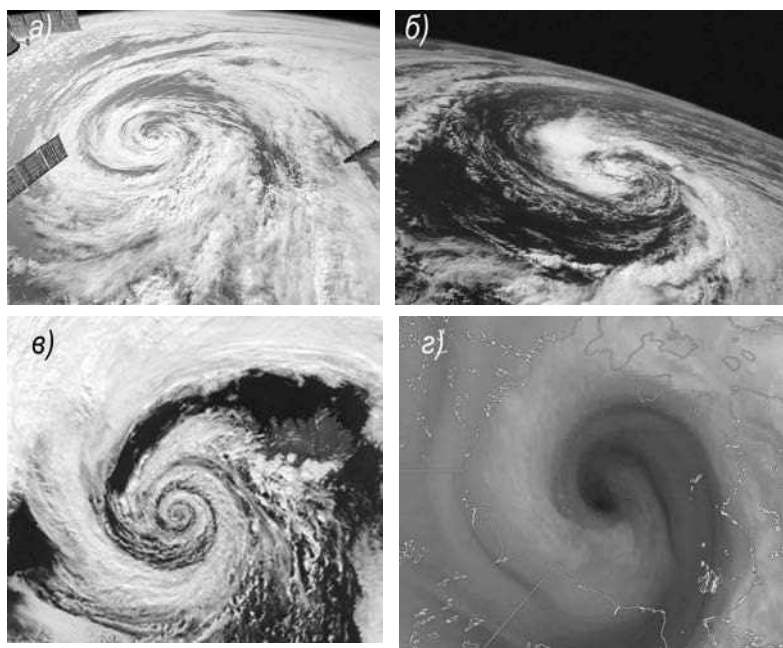


Рис. 2.27. Изображение фронта окклюзии во внутритропическом циклоне, полученные с борта МКС (*а* и *б*), с космического аппарата Terra (*в*) и в диапазоне поглощения водяного пара (*г*).

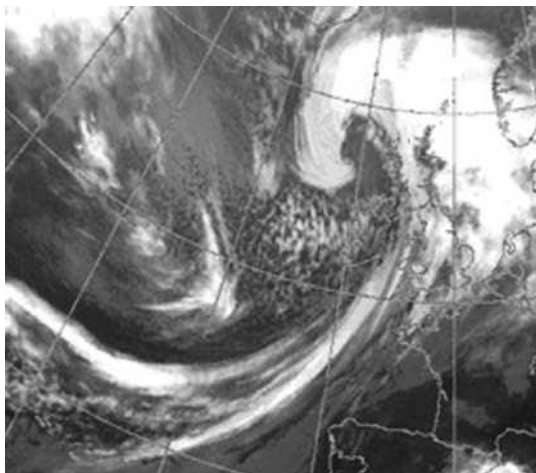


Рис. 2.28. Инфракрасный снимок области холодного фронта, расположенной в тылу атмосферного циклона.

Таким образом, для тыловой части циклона более характерна либо переменная облачность, либо облачность с прояснениями, что обусловлено особенностями облаков, образующихся в этой части барического образования. При этом кучевообразные облака могут быть как фронтальными, так и внутримассовыми, поскольку в тылу циклона формируется в той или иной мере неустойчивая воздушная масса. Если рассматривать области, расположенные за холодными фронтами на снимках облаков с ИСЗ, то весьма часто можно обнаружить поля конвективных ячеек (рис. 2.28).

Анализ снимков облачности, полученных с помощью ИСЗ, показал, что в тылу окклюдированных циклонов, за холодным фронтом, конвективные ячейки состоят из кучевообразных облаков. Вместе с тем в ряде случаев за холодным фронтом может наблюдаться малооблачная и даже безоблачная погода. Но за холодным фронтом могут наблюдаться и кучевообразные облака, которые образуются тогда, когда холодный воздух начинает прогреваться от подстилающей поверхности. Образование облаков конвекции свидетельствует о значительной неустойчивости холодного воздуха. Количество и мощность конвективной облачности могут быть различными и зависят от влажности холодного воздуха, степени его устойчивости и состояния подстилающей поверхности.

При заполнении циклонов их фронтальные облачные системы разрушаются, однако этот процесс происходит постепенно, и облачные спирали из кучевообразных облаков некоторое время сохраняются.

Подробное описание процесса облакообразования в соответствии с норвежской моделью жизненного цикла фронтальных циклонов связано с использованием ее в качестве методической основы разработки нормативных актов и рабочих или иных документов, относящихся к анализу и прогнозу погоды с использованием информации, получаемой с помощью данных дистанционного зондирования.

Глава 3

НЕЗАВЕРШЕННЫЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ФРОНТАЛЬНЫХ ЦИКЛОНОВ

К числу незавершенных моделей жизненного цикла внетропических фронтальных циклонов, которые оказали влияние на развитие спутниковой синоптической метеорологии, относятся модели Т. Карлсона и К.А. Браунинга, предложенные практически одновременно в 1980-х годах. Они были основаны на концепции *конвейерных лент* (в отечественных исследованиях принято другое название – *несущие полосы*).

3.1. ИЗЭНТРОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Традиционным для синоптической метеорологии является *изобарический анализ* трехмерной структуры атмосферы с использованием хронокартографического подхода, типичным представителем подхода является волновая модель норвежской / бергенской метеорологической школы, рассмотренная в главе 2. Ее достоинство заключается в том, что давление в атмосфере всюду непрерывно и оно всегда падает с высотой, а также то, что ветер в свободной атмосфере движется по изобарам и основные погодные системы обнаруживаются именно в поле давления. Недостатками такого анализа является то, что трехмерные траектории частиц *не лежат на изобарических поверхностях* и, значит, по картам барической топографии невозможно оценить вертикальные перемещения воздушных частиц.

Альтернативой изобарическому анализу является *изэнтропический анализ*, где в качестве вертикальной координаты используется *потенциальная температура*, а не давление. Трехмерная структура представляется с помощью набора карт *изэнтропических поверхностей*. Достоинство такого метода состоит в том, что указанные поверхности являются *материальными*, состоящими из одних и тех же материальных частиц. Частица, двигаясь по такой поверхности по своей траектории показывает *трехмерную траекторию своего движения*. По этим траекториям можно наблюдать вертикальные движения частиц воздуха и, следовательно, оценивать процесс облакообразования.

Метеорологические спутники в сочетании с традиционными радиозондовыми и радиолокационными наблюдениями предоставили новую возможность для изучения движения воздушных потоков внутри атмосферных циклонов.

3.2. МОДЕЛИ, СВЯЗАННЫЕ С НЕФРОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ АТМОСФЕРНОГО ЦИКЛОНА

3.2.1. МОДЕЛЬ ВНЕТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА КАРЛСОНА

С появлением метеорологических спутников Земли стандартные наблюдения дополнили данные дистанционного зондирования, но они существенно не изменили прежние концепции в синоптической метеорологии. Использование спутниковых изображений показало, что развитие циклонического возмущения часто сопровождается расширением облачного щита в направлении на запад и юго-запад (область, ограниченная штриховой кривой на рис.1.3)).

Распределение облаков может по форме напоминать запятую (так называемая облачность запятой, Comma на рис. 1.3), причем «головная часть» располагается в северной и западной частях облачного щита (области 1 и 2 на рис. 1.3). На более поздних этапах развития циклона слоистые облака простираются к западу и юго-западу от облаков среднего и верхнего ярусов (область 0 на рис. 1.3), в то время как безоблачная зона (область 3 на рис. 1.3) вторгается в область головы «запятой», отсекающей западный выступ облака от основной части облачного щита (рис. 3.1). Стрелки указывают расположение основных максимумов скорости ветра в верхних слоях тропосферы. Особенностью модели Т. Карлсона, является отсутствие фронта окклюзии.

Рассмотрим далее движение воздуха через волновое возмущение в изобаротропической системе, в которой ветер представляется на поверхностях с постоянной потенциальной температурой, где происходит подъем крупномасштабной области насыщенного влагой воздуха по наклонный

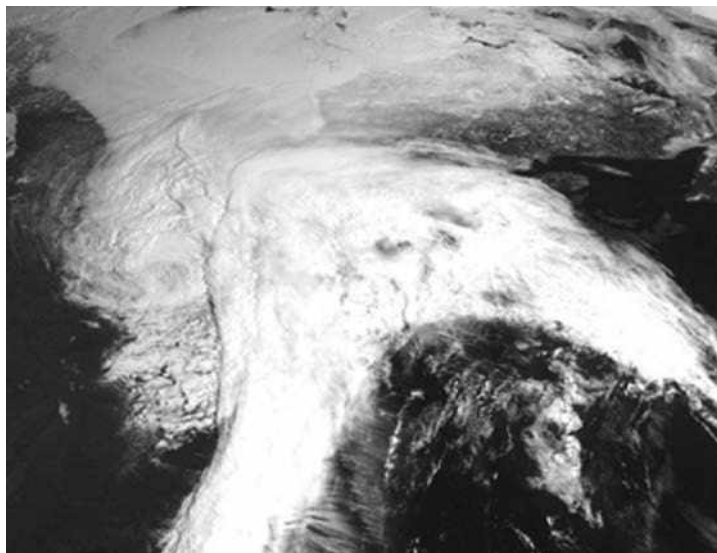


Рис. 3.1. Изображение облачного щита.

поверхности теплого фронта. Поле ветра в системе представляется относительно движения крупномасштабного возмущения. Предположение, что циклоническая система перемещается устойчиво, без изменения скорости или формы, позволяет вычесть векторную фазовую скорость из измеренных значений вектора ветра и использовать эти относительные значения для построения набора линий тока, которые также являются траекториями относительно движения системы.

Методика изоэнтропического анализа относительного потока позволила выявить потоки воздуха на изоэнтропических поверхностях относительно движения зрелого циклона в средних широтах. Этот поток дает представление о том, как рисунок облачного покрова, видимый на спутниковых изображениях, полученных в различных частях спектра излучения, приобретает знакомую форму запятой.

Типичная система несущих полос в среднеширотных циклонах, построенная Т. Карлсоном, показана на рис. 3.2.

На изображениях просматриваются три основных воздушных потока различного происхождения. Два из них берут начало в приземном слое (влажная и холодная несущие полосы на рис. 3.2 *а* и *б*), а третий — в верхней тропосфере к западу от оси ложбины (рис. 3.2 *в*), наблюдаемой на приземной карте.

Первый воздушный поток (влажная несущая полоса на рис. 3.2 *а*), поступает в циклон в восточном потоке на высоте 800 гПа с востока к югу от центра в теплом секторе (так называемый «влажная несущая полоса»). Эта несущая полоса поднимается вдоль холодного и теплого фронтов, отклоняется к северу средним потоком и в конечном итоге отклоняется на восток сильным западным ветром на высоте в северном направлении до высоты 500 гПа и поворачивает на восток-северо-восток примерно параллельно положению холодного фронта. Затем она поднимается вверх до высоты 300 гПа, поворачиваясь антициклонически над теплым фронтом и присоединяясь к потоку, перемещающемуся на восток. Облака, связанные с юго-западным течением вдоль холодного фронта и к северу от теплого фронта, образуют тело и хвост запятой.

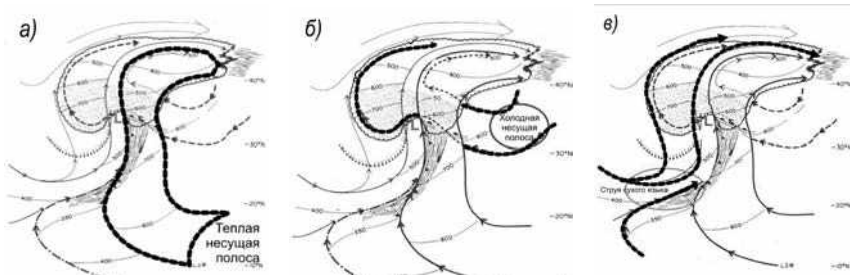


Рис. 3.2. Система несущих полос в среднеширотных фронтальных циклонах по Т. Карлсону.

а — влажная несущая полоса, *б* — холодная несущая полоса, *в* — заток воздуха в тыл циклона.

Второй воздушный поток, называемый холодной несущей полосой, берет начало в антициклоническом восходящем потоке на высоте 800 гПа, ныряет под влажную несущую полосу перед теплым фронтом на высоте 700 гПа, затем на высоте 500 гПа поворачивает антициклонически на северо-восток и параллельно влажной несущей полосе уходит на восток (см. рис. 3.2 б). Этот воздух продолжает подниматься и антициклонически поворачивает на северо-восток вместе с теплой и влажной несущей полосой и в верхней тропосфере уходит на восток. Облака нижнего и среднего яруса, связанные с частью холодной несущей полосы, расположенной к западу и северу от центра пониженного давления, образуют продолжение запятой в западном направлении.

В конечном итоге воздух холодной несущей полосы отклоняется на восток высотным потоком и выходит из циклона к северо-востоку от центра.

Отчетливо видимый острый край облачного рисунка на западном краю хвоста запятой, а также северная и северо-западная части головы запятой составляют антициклонически изогнутый край щита перистой облачности к северо-востоку от зоны низкого давления и обусловлены слиянием влажного воздуха с третьим главным воздушным потоком.

Часть воздушного потока антициклонически опускается в нижнюю тропосферу к востоку от приземной системы низкого давления. Часть этого воздуха разделяется с антициклоническим потоком, течет параллельно теплой несущей полосе в безоблачной зоне и поднимается выше. Юго-западная несущая полоса, ядро которой располагается вдоль восточного края затока сухого воздуха в тыл циклона, проходит вдоль линии слияния теплой несущей полосы и сухого воздушного потока. Воздух с юга, протекающий через теплый сектор над теплой несущей полосой, берет начало на среднем и верхнем уровнях. Этот воздух может быть ненасыщенным, когда достигает теплого сектора, поэтому он должен проходить над облачным экраном несущей полосы или вокруг него. Южный поток над влажной несущей полосой может формировать облачность в виде обширного щита перистых облаков над теплым сектором циклона или внутри узкой полосы облаков вдоль запятой. Поскольку этот верхний тропосферный поток также сливается с сухим потоком на западе, западная граница верхнего щита перистой облачности в теплом секторе будет очень резкой.

Холодный сухой воздух на верхних и средних высотах поступает с западного направления (см. рис. 3.2 в), к югу от центра циклона и к западу от холодного фронта (так называемая «струя сухого языка»).

Этот воздух сначала опускается к средним и нижним горизонтам (образуя сухую щель и холодный фронт) и отклоняется течением к северу в пределах ложбины на средней высоте. Часть этого воздуха входит в «голову» запятой, вытесняется вверх и отклоняется на восток среднеуровневым потоком и выходит из циклона на северо-восток.

Верхняя часть облачности несущей полосы холодного воздуха обычно находится ниже, чем полоса облаков теплой несущей полосы. Западная



Рис. 3.3. Террасирование слоев облачности циклона в вечернее время.

граница последнего облака видна на спутниковых фотографиях, особенно при небольшом угле солнца, когда эффект террасирования облачности подчеркивается рельефно за счет теней (рис. 3.3).

Воздух внутри старого облачного слоя движется на запад почти перпендикулярно теплой несущей полосе в направлении холодного воздуха к западу от области низкого давления. Таким образом, начало расширения облаков на запад также связано с быстро меняющимся ветром с высотой и с сильной адвекцией теплого воздуха к северу и западу. По мере того как облачный щит расширяется на запад, значительное количество осадков рециркулирует из теплого воздуха и выпадает в присутствии относительно холодного воздуха к западу от низколежащей поверхности.

Т. Карлсон не построил завершенной модели жизненного цикла фронтального внетропического циклона на основе изэнтропического анализа. Но его предложение по работе с картами изэнтропического анализа было развито в модель жизненного цикла Шапиро — Кейзера.

3.2.2. МОДЕЛЬ МОРСКОГО ВНЕТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА БРАУНИНГА

Автор другой незавершенной модели внетропического циклона К. Браунинг рассмотрел ситуацию с моделью жизненного цикла атмосферного циклона с точки зрения создания концептуальной модели системы осадков в циклоне. Он, в частности, детально описал механизм формирования так называемой мгновенной окклюзии, характерной для «морского циклона». Указанный вид атмосферных циклонов наблюдается в северной части Атлантического и Тихого океанов.

Измерения *in situ* сами по себе не являются адекватными средствами наблюдения в мезомасштабном и синоптическом пространстве. Для на-

блюдения атмосферных явлений указанного масштаба целесообразно использовать измерения с помощью средств дистанционного зондирования, которые совместно с наземными радиолокационными наблюдениями дают возможность описать многие мезо- и макромасштабные особенности облаков. Информацию о температуре в этом диапазоне получить сложно, поскольку подстилающая поверхность закрыта облачностью. Тем не менее по положению воздушных потоков можно иногда оценить расположение температурных градиентов по форме и движению облаков с помощью тех же моделей облачности (это требует привлечения частично субъективной интерпретации данных).

Первое требование, предъявляемое для анализа мезомасштабных характеристик облачности во фронтальных системах, заключается в том, чтобы иметь структуру синоптического масштаба, которая дает возможность согласовывать наблюдения естественным способом. Для этого К. Браунинг также предложил использовать идею «конвейерных лент» (несущих полос), которая идентифицирует основные воздушные потоки, создающие облачные поля.

Доминирующим механизмом во фронтальных системах по Браунингу является бароклиный подъем воздушной массы по косой наклонной фронтальной поверхности.

Практика показала, что концепция теплой несущей полосы работает и что в этих потоках теплого влажного воздуха относительная структура ветра расположена внутри резко выраженной левой стороны поля облачности. Пример четко очерченной облачной полосы, связанной с теплой несущей полосой, приведен на рис. 3.4.

Воздух в теплой несущей полосе распространяется по всей длине холодного фронта, часть которого часто имеет форму низко расположенной струи в пограничном слое атмосферы непосредственно перед положением холодного фронта на земной поверхности. Самый теплый воздух, возникший дальше всего на юге, обычно находится непосредственно перед приземным холодным фронтом в теплом секторе циклона. Связанный с этим отрицательный горизонтальный градиент температуры перед холодным фронтом на теплой несущей полосе посредством теплового ветра объясняет уменьшение скорости ветра над низкоуровневым потоком.

Несмотря на то, что основная составляющая движения в пределах теплого несущего потока параллельна холодному фронту, относительно небольшая составляющая, перпендикулярная ему, имеет важное значение для его структуры. Различают следующие две противоположные ситуации (см. рис 3.5).

1. *Конфигурация «подъем теплой несущей полосы с уклоном вперед»* (рис. 3.5 а), в которой воздух внутри и над теплой несущей полосой имеет составляющую движения вперед по отношению к движению холодного фронта; при этом его основная область косого подъема располагается дальше



Рис. 3.4. Пример изображения в инфракрасном диапазоне четко очерченной облачности, связанной с теплой несущей полосой.

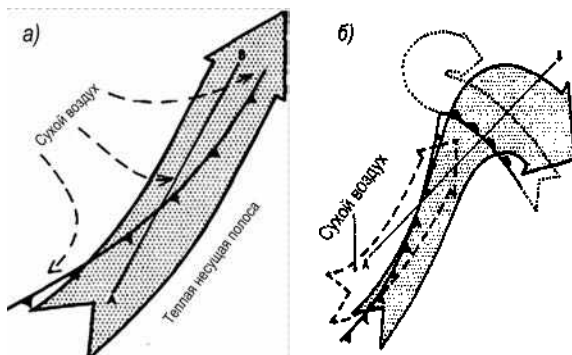


Рис. 3.5. Схематическое изображение воздушного потока на холодном фронте.

а) конфигурация «подъем теплой несущей полосы с уклоном вперед», б) конфигурация «подъем теплой несущей полосы с уклоном назад».

по ветру в областях фронтальной бароклинности. Переходы между пологим и поступательным подъемом могут происходить на всем холодном фронте.

Браунингом было показано, что холодный среднетропосферный воздух (штриховая стрелка) обгоняет холодный фронт и создает потенциальную неустойчивость в верхних частях теплой несущей полосы. Конфигурация с наклонным вперед подъемом, показанная на рис. 3.5 а, соответствует

холодному катафронту, при котором основной подъем происходит перед приземным холодным фронтом, а опустившийся перед этим воздух с низкой потенциальной температурой перекрывает теплый воздух несущей полосы в средней тропосфере. Это приводит к возникновению потенциальной неустойчивости, которая реализуется как конвекция, как только общий поток поднимется на достаточную высоту. В конце концов, облачный теплый поток поворачивает антициклонически (т. е. вправо), поскольку он догоняет холодный воздух и поднимается над ним впереди приземного теплого фронта. Выпуклая граница этого потока, направленная к полюсу, где он поднимается и поворачивает вправо, часто четко обнаруживается на видимых со спутника снимках по тени, которую верхнее облако отбрасывает на нижний слой облаков.

Теплая несущая полоса была определена как доминирующий поток, вызывающий облака и осадки в среднеширотных циклонах. Вторичным облачным потоком является холодный несущий поток (точечная стрелка на рис. 3.5 б), который берет начало в антициклоническом низкоуровневом потоке к северо-востоку от циклона. По отношению к надвигающемуся циклону воздух в холодной несущей полосе движется на запад прямо перед приземным теплым фронтом под теплой несущей полосой. Сначала этот воздух опускается к поверхности Земли и становится очень сухим. Двигаясь на запад к центру циклона, этот воздух начинает подниматься, достигая средней тропосферы вблизи вершины теплого сектора. Когда холодная несущая полоса выходит из-под западного края теплой несущей полосы, она может подниматься антициклонически и сливаться с теплой несущей полосой, как показано на рис. 3.5 б. Область облака, связанная с формирующейся холодной несущей полосой, представляет собой головную часть крупномасштабной облачности в форме запятой.

Браунигом было введено понятие «мгновенная окклюзия» — это название, данное лямбдаобразному (λ) облачному узору, образуемому

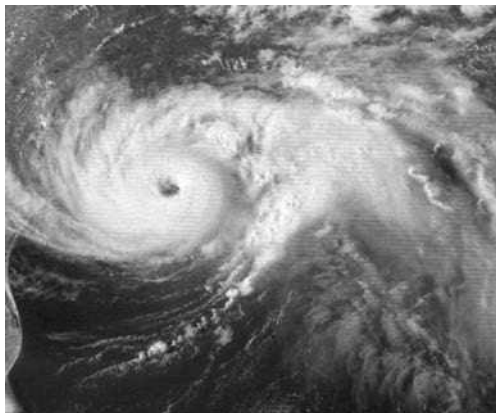


Рис. 3.6. Изображение мгновенной окклюзии.

в случае, когда полоса облаков, связанная с полярной ложбиной на синоптической карте, взаимодействует с полосой облаков, связанной с холодным полярным фронтом. На рис. 3.6. приведен пример изображения мгновенной окклюзии, называемой также псевдоокклюзией.

Трансформация облачных массивов несущих полос в псевдоокклюзию приведена на рис. 3.7.

Процесс формирования мгновенной окклюзии интерпретируется Браунингом в терминах конфигурации двойной несущей полосы с двумя их небольшими потоками, пересекающимися под прямым углом. Совсем не связанный с классическим процессом окклюзии воздух в несущей полосе

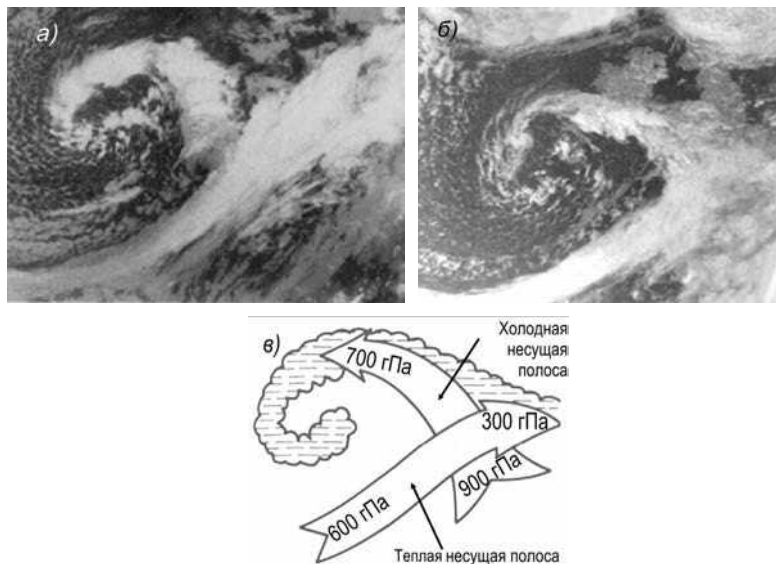


Рис. 3.7. Трансформация облачных массивов несущих полос в псевдоокклюзию.

а) изображение, полученной в видимом диапазоне; б) изображение, полученное в инфракрасном диапазоне; в) схема формирования псевдоокклюзии.

имеет наибольшую положительную аномалию температуры и влажности на высоте до двух километров.

2. Конфигурация «подъем теплой несущей полосы с уклоном назад» (рис. 3.5 б), при которой воздух в теплой конвейерной ленте имеет составляющую движения назад по отношению к движению холодного фронта и при которой косой подъем происходит вблизи и выше холодной фронтальной зоны. Таковой называется конфигурация, в которой часть или весь теплый воздух несущей полосы поднимается с наклоном назад над клином холодного воздуха.

Теплый воздух в пограничном слое перед приземным холодным фронтом резко поднимается вверх со скоростью до нескольких метров в секунду и формирует узкую облачную полосу, примыкающую к поверхности холодного фронта. Было показано, что скрытая теплота в присутствии трения является

важным фактором, влияющим на силу как струи на малых высотах, так и циклонического сдвига. Воздух поднимается всего на 2—3 км при резком подъеме на приповерхностном холодном фронте. Далее он поднимается косо со скоростью несколько десятков сантиметров в секунду над клином холодного воздуха.

Как известно, первым требованием при анализе мезомасштабных особенностей полей облаков и осадков во фронтальных системах является наличие структуры синоптического масштаба, на основе которой происходит согласование наблюдений, выполняемых обычным способом. Предложенная Браунингом концепция основана также на предположении несущих потоков. Как и в модели Карлсона, у Браунинга в общем случае система внетропического циклона включает в себя теплые и холодные несущие полосы. Модель Браунинга отличается описанием процесса формирования мгновенной окклюзии.

На рис. 3.7 б показано соединение полос облаков через некоторое время и формирование облачности в форме буквы λ .

Имеется и другая интерпретация мгновенной или псевдоокклюзии, а именно как части типов облачных образований (рис. 3.8), в которых форма волны зависит от положения коротковолновой ложбины или максимума завихрения относительно полярного фронта.

Необходимость введения понятия псевдоокклюзии (мгновенной окклюзии) вызвана несоответствием механизма формирования окклюзии в норвежской модели реально наблюдаемому развитию изображения облачности окклюзии по снимкам с ИСЗ. В первом случае окклюзия должна распространяться от точки смыкания холодного и теплого фронтов слева направо. На снимках же облачная полоса распространяется справа налево (см. рис. 3.7 и 3.8).

Модели Карлсона и Браунинга были созданы для изучения районов выпадения осадков. Однако необходимо отметить, что эти модели не предусматривают образования у атмосферного циклона фронта окклюзии. Полученные ими результаты исследований дали возможность развить новые модели жизненного цикла атмосферных фронтальных циклонов.

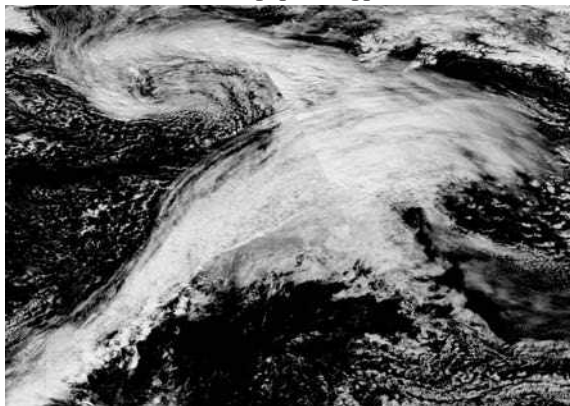


Рис. 3.8. Изображение мгновенной окклюзии, полученное в видимом диапазоне.

Глава 4

МОДЕЛЬ ШАПИРО — КЕЙЗЕРА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Модель Шапиро — Кейзера была разработана в конце 1980-х годов на основе анализа космических снимков, полученных с помощью метеорологических спутников Земли и численного моделирования. Она была названа по имени авторов исследования, впервые ее представивших.

Схема жизненного цикла фронтального внетропического атмосферного циклона Шапиро — Кейзера приведена на рис. 4.1. Первый этап жизненного цикла рассматриваемого циклона подобен стадии волны норвежского атмосферного циклона, описанной в главе 2.

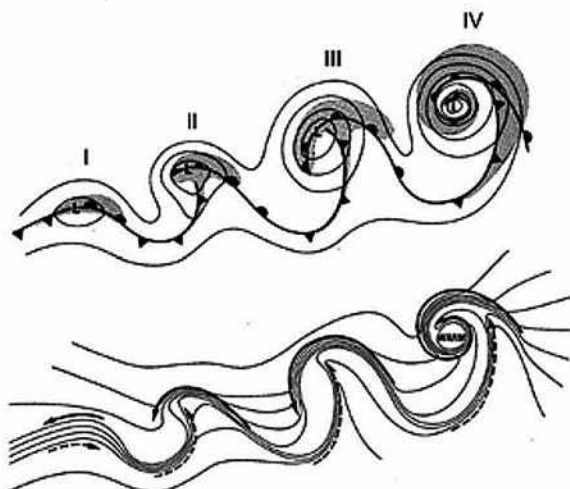


Рис. 4.1. Схема эволюции циклона согласно модели жизненного цикла Шапиро — Кейзера.

Модель Шапиро — Кейзера точнее описывает быстрое (взрывное) углубление циклона во время его развития. На рис. 4.2 приведен пример быстрого циклогенеза, развивающегося над Северной Атлантикой. В образовавшемся циклоне давление менее чем за сутки (в центре области низкого давления) упало с 961 до 946 гПа.

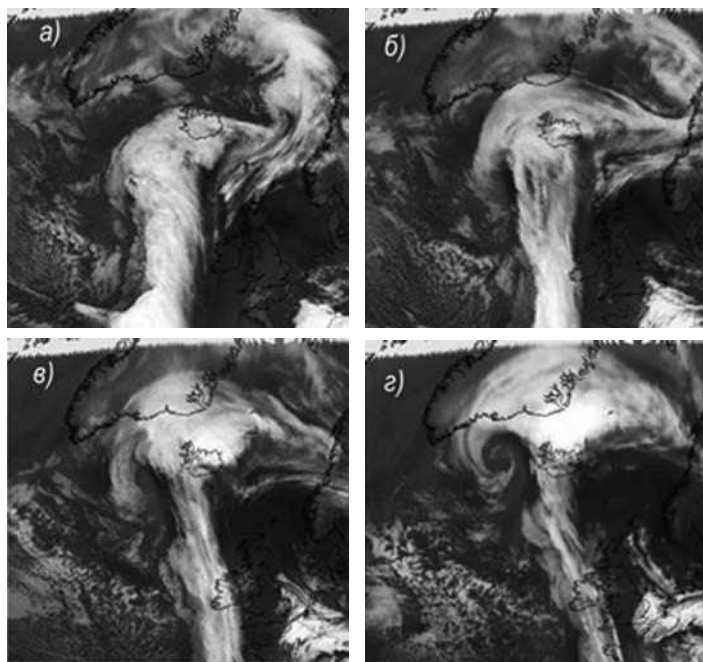


Рис. 4.2. Последовательные изображения поля облачности циклона при быстром (взрывным) циклогенезе.

В приведенной серии изображений можно наблюдать формирование облачной циклонической спирали (обычно называемой окклюзией), которая не является результатом классического процесса окклюдирования, описанного в норвежской модели жизненного цикла атмосферных циклонов. Формирование облачной полосы фронта окклюзии в данном случае анализа серии было признано целесообразным описывать с помощью теории несущих полос (конвейерных лент), поскольку слияния теплого и холодного фронтов на снимках, приведенных на рис. 4.2, не наблюдается.

Авторы модели обнаружили, что для некоторых типов циклогенеза структура поля облачности не подтверждает классическую норвежскую модель фронтального циклона, где процесс окклюзии является результатом слияния холодного и теплого фронтов. Вместо этого, например, наблюдался перелом холодного фронта в том месте, где он по теории должен плавно переходить в теплый (рис. 4.3). Сформировавшаяся Т-образная область стала отличительным признаком новой модели. Другой ее важной характеристикой является моделирование реально наблюдаемой на снимках теплой изолированной области, возникновения которой не предусмотрено в норвежской модели циклонов.

«Фронт окклюзии», вернее конфигурация облачного покрова, наблюдаемая в том месте, где по норвежской модели должен образоваться фронт

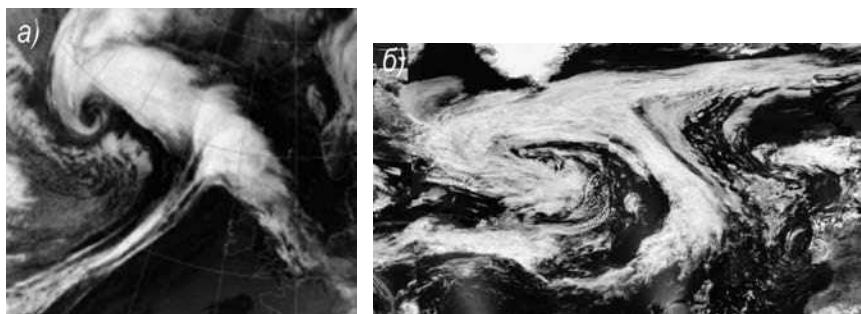


Рис. 4.3. Примеры изображений атмосферных циклонов, интерпретируемых как воплощение модели Шапиро — Кейзера.

окклюзии, формируется без непосредственного слияния теплого и холодного фронтов. В новой модели холодный фронт не привязан к циклону, а перемещается перпендикулярно основному теплому фронту с развитием в тылу циклона изолированной области теплого воздуха, окруженной облачностью. При этом видимого смыкания фронтов (как в норвежской модели) также не происходит. В основу модели была положена концепция «конвейерных лент» (несущих полос), предложенная ранее Т. Карлсоном и М. Браунингом для моделирования тонкой структуры воздушных потоков в атмосферном циклоне.

4.2. СТРУКТУРА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МОДЕЛИ ШАПИРО — КЕЙЗЕРА

Схема эволюции циклона по модели Шапиро — Кейзера приведена на рис. 4.1. Отличительным признаком такой эволюции является возникновение секклюдии — отсечения и замыкание части теплого сектора вблизи центра циклона. Жизненный цикл циклона включает четыре этапа:

I этап — зарождение фронтального циклона (стадия волны),

II этап — фронтальный перелом,

III этап — образование Т-образной структуры разорванного холодного фронта,

IV этап — заполнение и изоляция теплого ядра.

Соответствующим стадиям циклонов разделены примерно 6—24 часами. Характерный масштаб циклонов, основанный на расстоянии от минимума геопотенциальной высоты, обозначенного буквой L на рис. 4.1, до крайнего контура геопотенциальной высоты на стадии IV, составляет 1000 км.

Циклоны по модели Шапиро — Кейзера начинают развиваться с непрерывного и широкого бароклинного фронта (рис. 4.1, I стадия). По мере развития циклона в районе его центра происходит фронтальный разлом, холодный фронт отделяется от теплого и входит в воздух теплого сектора (рис. 4.1, II стадия). В то время как холодный фронт движется на восток в теплый сектор, теплый фронт развивается в западном направлении. Это

расширение теплого фронта начинает оборачиваться вокруг задней части циклона, движимого холодным северным потоком, и образует изогнутый фронт. Такой фронт имеет структуру теплого фронта, а не фронта окклюзии, как в норвежской модели. Для обозначения холодного фронта, ориентированного перпендикулярно загнутому продолжению теплого фронта, используется термин «Т-образный» (рис. 4.1, III стадия). В фазе максимальной интенсивности формируется, образно говоря, «теплоядерная фронтальная изоляция». Холодный фронт продвигается дальше к востоку от центра циклона и вместе с отогнутым теплым фронтом начинает огибать и запирает относительно теплый воздух в центре циклона. Это уединение формируется в полярном воздухе и в отличие от норвежской модели не включает воздух из теплого сектора (рис. 4.1, IV стадия).

4.2.1. ПЕРВАЯ СТАДИЯ РАЗВИТИЯ ЦИКЛОНА ПО МОДЕЛИ ШАПИРО — КЕЙЗЕРА (СТАДИЯ ВОЛНЫ)

Первая стадия в развитии циклона по модели Шапиро — Кейзера (стадия волны) заключается в образовании области пониженного давления в широкой фронтальной зоне из-за бароклинической неустойчивости. На этом этапе образуются слабо выраженные фронты, которые объединяются друг с другом в центре формирующегося циклона. Заток теплого и холодного воздуха относительно слабый, потоки направлены в противоположных направлениях вдоль фронта. На рис. 4.4 представлена схема стадии волны.

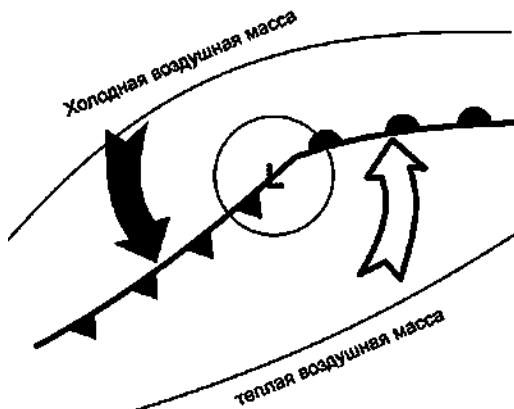


Рис. 4.4. Схема стадии волны.

Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования. Черная стрелка указывает направление движения холодного воздуха, белая стрелка — теплого воздуха. На рис. 4.5 приведено изображение поля облачности, сформировавшегося на первом этапе образования циклона. Т-образная структура еще находится на начальной стадии развития и явным образом не отображается.

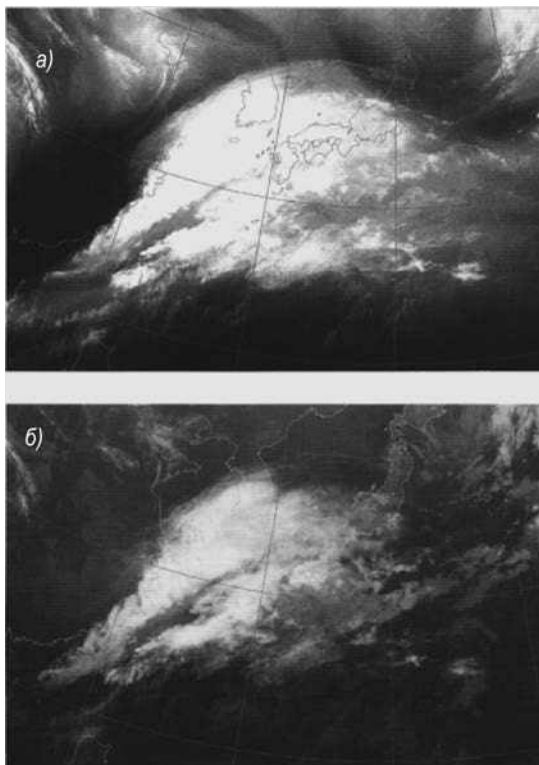


Рис. 4.5. Изображения поля облачности на первом этапе формирования циклона, полученные в полосе поглощения водяного пара (а) и в инфракрасном диапазоне спектра излучения (б).

4.2.2. ВТОРАЯ СТАДИЯ РАЗВИТИЯ ЦИКЛОНА ПО МОДЕЛИ ШАПИРО — КЕЙЗЕРА (ФРОНТАЛЬНЫЙ ПЕРЕЛОМ)

Далее следует второй этап циклогенеза — стадия молодого циклона, или стадия фронтального перелома. На рис. 4.6 приведено графическое изображение стадии молодого циклона по модели Шапиро — Кейзера. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования: черная стрелка — поток холодного воздуха, белая стрелка — поток теплого воздуха.

На этом этапе фронтальная поверхность становится все более изогнутой. Она прерывает линии теплого и холодного фронтов. Глубоко в центр циклона вторгается гребень тепла. На данном этапе можно провести еще одну замкнутую изобару. В этот момент воздушные потоки искривляются, а их скорость увеличивается. Фактически холодный и теплый фронты все еще связаны неактивной границей воздушных масс, которую обычно не проводят на синоптических картах (серая линия).

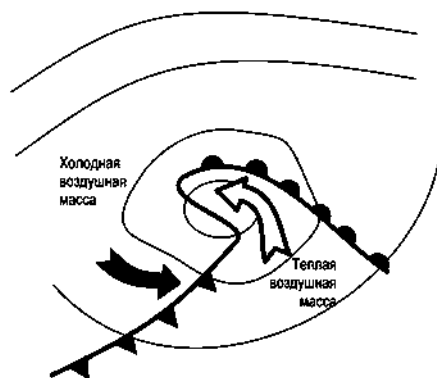


Рис. 4.6. Графическое изображение второй стадии фронтального перелома по модели Шапиро — Кейзера.

На снимках, приведенных на рис. 4.7, облачная зона сместилась на акваторию океана южнее Японии и приобрела вытянутую на восток и запад форму (по сравнению с типичным положением). Ее северный край имеет повышенную антициклоническую кривизну. На изображении также виден теплый рисунок окклюзии. Однако при объективном анализе на изобарической поверхности 850 гПа холодный воздух на юг не переместился и начала процесса окклюзии не наблюдается.

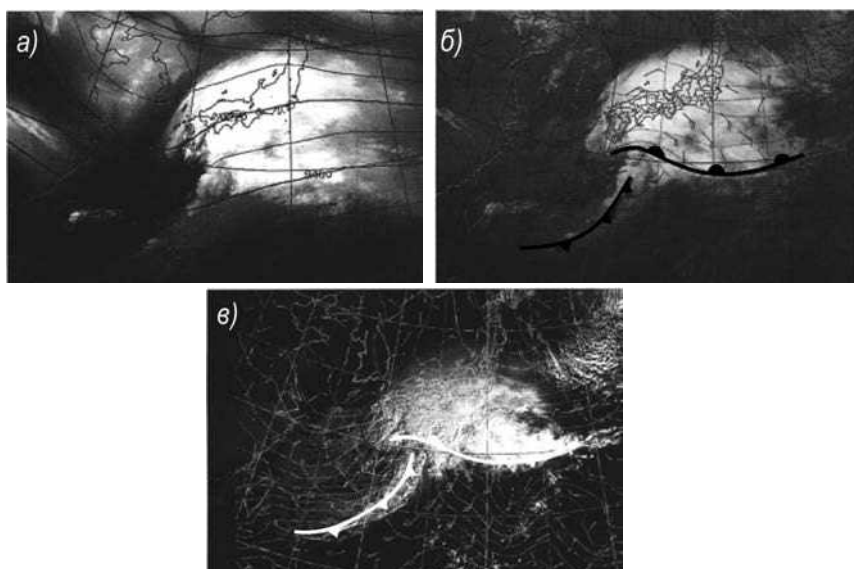


Рис. 4.7. Изображения поля облачности на втором этапе формирования циклона по модели Шапиро — Кейзера (этап фронтального перелома), полученные в полосе поглощения водяного пара (а), в инфракрасном диапазоне (б) и в видимом диапазоне (в).

Облачная полоса, включающая конвективные облака, связанные с холодным фронтом, пересекается примерно под прямым углом с зоной облачности, соответствующей теплому фронту (см. рис 4.6 и 4.7 б и в).

При объективном анализе карты барической топографии поверхности 850 гПа — это участок, где холодная адвекция более интенсивна и структура холодного фронта четкая в отличие от структуры северной части холодного фронта. Таким образом, холодный фронт уменьшился по градиенту температуры вблизи места контакта с теплым фронтом, и это подпадает под структуру фронтального разрушения модели Шапиро—Кейзера. Однако на спутниковом снимке трудно различить трещиноватые и участки без трещин.

Пример изображений процесса развития Т-образной области холодного перелома приведено на рис. 4.7.

4.2.3. ТРЕТИЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ЦИКЛОНА ПО МОДЕЛИ ШАПИРО — КЕЙЗЕРА

Затем следует третий этап — стадия максимального развития или образование Т-образной структуры разорванного холодного фронта, на которой, в отличие от норвежской модели смыкания фронтов (окклюзия) не образуется. Вместо этого от холодного воздуха отделяется теплое ядро циклона, которое сходно с теплым фронтом (рис. 4.8). Там, где по норвежской модели должна наблюдаться окклюзия, замечен теплый изогнутый фронт. На стадии максимального развития разомкнутые фронты располагаются перпендикулярно друг другу. При углублении циклона воздушные потоки все сильнее искривляются: холодный воздух направляется в тыловую часть циклона, а теплый — в центр со стороны теплого сектора. При развитии циклонов по типу Шапиро — Кейзера холодный фронт приближается к теплову, образуя Т-образную структуру облачности.

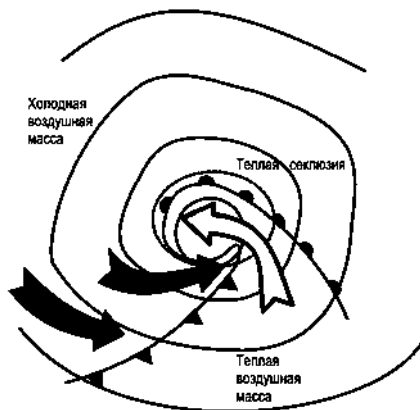


Рис. 4.8. Графическое изображение стадии максимального развития циклона по типу Шапиро — Кейзера.

Стрелками указано направление движения воздушных масс внутри барического образования.

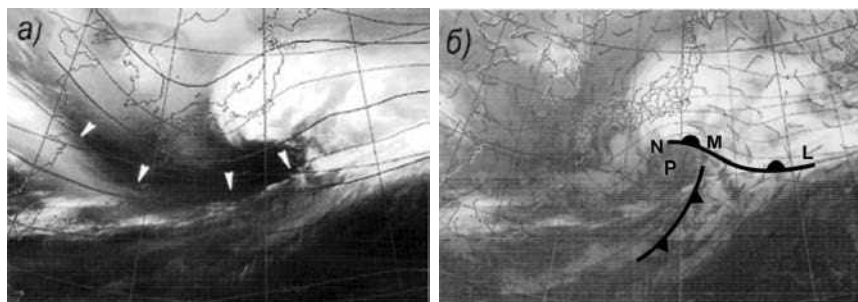


Рис. 4.9. Пример изображения поля облачности на третьем этапе формирования циклона по модели Шапиро — Кейзера — этапе образования Т-образной структуры разорванного холодного фронта.

а) изображение, полученное в полосе поглощения водяного пара,
б) инфракрасное изображение.

Пример образования Т-образной структуры разорванного холодного фронта приведен на рис. 4.9.

В циклоне, переместившемся с материка на океан, мощная область вдоль линии L — M — N расположена перед циклоном и простирается в направлении с востока на запад, а полоса облачности, соответствующая холодному фронту, пересекается под прямым углом к этой области облаков и простирается почти в южном направлении. Таким образом, рисунок буквы Т стал четким.

При объективном анализе карт изобарической поверхности 850 гПа участок L — M — N имеет отчетливую структуру теплого фронта. К югу от точки N на рис. 4.9 б виден вихрь из низко расположенной слоистой облачности. Исходя из этого и времени наступления минимального давления центр циклона можно проанализировать вблизи точки N. Согласно модели Шапиро — Кейзера, отогнутый теплый фронт будет лежать на южной границе области облачности от точки M до точки N или на восточной границе N — P области низкой облачности, простираясь на юг дальше от точки N. Однако эти области облаков перемещаются против часовой стрелки так, как будто они обвивают центр циклона холодным воздухом. В модели Шапиро — Кейзера центр циклона, по-видимому, находится вблизи от пересечения фронтов в точке M. Во многих случаях вблизи точки N к западу от точки M виден вихрь из низкой облачности, и там анализируется центр циклона.

4.2.4. ЧЕТВЕРТАЯ СТАДИЯ — ЗАПОЛНЕНИЕ И ИЗОЛЯЦИИ ТЕПЛОГО ЯДРА ЦИКЛОНА ПО МОДЕЛИ ШАПИРО — КЕЙЗЕРА

Четвертый этап жизненного цикла — стадия заполнения — характеризуется образованием окклюзии. При этом, естественно, образуется фронт окклюзии, который оборачивает теплый центр циклона. На этой стадии скорость воздушных потоков максимальна, изотермы замыкаются и образуют теплое ядро в центре циклона.

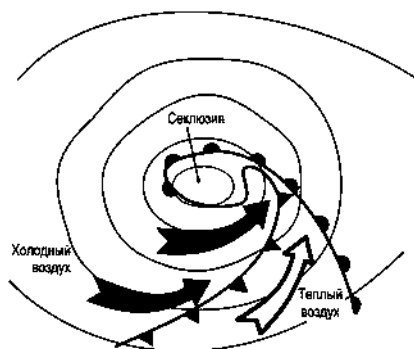


Рис. 4.10. Графическое изображение стадии заполнения циклона.

Графическое изображение стадии заполнения циклона приведено на рис. 4.10. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования.

Пример формирования изолированной области теплого воздуха (секлюзии) приведен на рис. 4.11, где показано развитие Т-образной структуры поля облачности и изолированного ядра теплого воздуха атмосферного циклона.

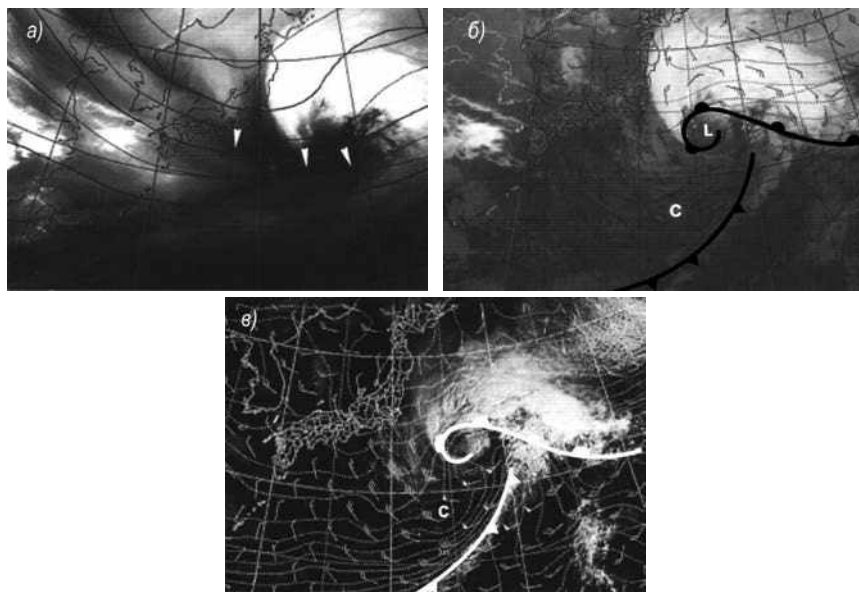


Рис. 4.11. Пример изображения поля облачности на четвертом этапе формирования циклона по модели Шапиро — Кейзера.

а) изображение в полосе поглощения водяного пара, б) инфракрасное изображение, в) изображение в видимом диапазоне.

Из-за затока в тыл циклона узкой полосы холодного воздуха (обозначенной белыми треугольниками на рис. 4.11 *а* нижняя граница облачного вихря теплого сектора стала более отчетливой. Эта полоса, опираясь своей фронтальной частью на теплый сектор, деформирует его и начинает циклоническое вращение, которое, с одной стороны, перемещает левую часть облачного щита теплого фронта в направлении на север, создавая антициклоническую кривизну в восточной части облачного щита. С другой стороны, эта полоса, двигаясь циклонически, деформирует теплый сектор и отсекает его, создавая в центре циклона L (рис. 4.11 *б*) область секлюзии.

Полоса облачности верхнего яруса на северной части теплого фронта пересекается с облачной полосой, соответствующей холодному фронту, простирающемуся на юг, продолжая формировать Т-образный рисунок. Вихрь низкой облачности соответствует центру циклона L.

На этом этапе модели Шапиро — Кейзера продолжается изоляция теплого ядра. Согласно модели, теплый фронт будет анализироваться на краю облака, окружающего центр, как показано на рис. 4.11. В действительности, однако, фронт, опоясывающий таким образом центр, не анализируется. Вблизи центра циклона отчетливое теплое ядро не формируется. Однако структура фронтального разлома формирует ветровое поле, стремящееся изолировать теплое ядро в центре. Это означает, что холодная адвекция интенсивна в области С вдали от центра, поэтому она имеет тенденцию оставлять теплое ядро вблизи центра. Вихрь из облаков нижнего яруса, состоящий из Cu и Sc, присутствует на спутниковом снимке и соответствует теплему ядру. Эти области облаков обладают слабой конвективной активностью и отличаются от ячеистых конвективных облаков, образованных вторжением холодного воздуха. На основании этого факта предполагается, что облачные области состоят из воздушных масс, более теплых, чем окружающая среда.

Рассмотрев динамику формирования циклона, можно сделать вывод о том, что циклоны по типу Шапиро — Кейзера имеют свои особенности роста, позволяющие отличить их от циклонов, описываемых моделью норвежской школы:

- перелом холодного фронта;
- развитие холодного фронта через теплый сектор;
- холодный фронт перпендикулярен теплему фронту;
- образование секлюзии и развитие окклюзии из элементов теплого фронта.

4.3. РОЛЬ НЕСУЩИХ ПОТОКОВ В ФОРМИРОВАНИИ ОБЛАЧНОЙ СПИРАЛИ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ МОДЕЛИ ШАПИРО — КЕЙЗЕРА

Формирование облачной спирали в циклонах по модели Шапиро — Кейзера описывается с помощью теории «несущих полос», разработанных Т. Карлсоном и К. Браунингом. Она предполагает, что перенос воздушных масс относительно смещения фронтальной системы происходит вместе со всем циклоном.

Браунинг смог доказать, что система воздушных потоков действует в верхних слоях атмосферы, тогда как стандартная модель норвежского циклона описывает только формирование погоды на нижних ее уровнях. Он ввел термин «несущая полоса» и разбил их на три типа: теплая, холодная и сухая.

Теплый несущий поток, как правило, движется на север перед холодным фронтом, а затем, догнав его, поворачивает вправо на восток, начиная движение вверх к теплому фронту и влияя на его наклон. Поток достигает высоты 500 гПа и более. Он отвечает за перенос теплого воздуха в формирующемся циклоне. Теплый несущий поток, который оказывается в более холодном воздухе, приводит к образованию свойственной для теплого фронта облачности (перистой, слоистой, слоисто-дождевой).

После того как в циклоне начинает проявляться фронт окклюзии, теплая несущая полоса становится ему параллельно, образуя над ним гребень тепла. Он влияет на конденсацию водяного пара, из-за чего на земную поверхность выпадают обильные осадки. Их интенсивность зависит от влажности воздуха, поступающего на теплую несущую полосу: чем более влажный воздух, тем больше выпадает осадков, чем меньше влажность, тем меньше осадков. Кроме того, количество осадков зависит от скорости углубления барического образования, так как в этом случае гребень тепла более вытянут по вертикали, и, следовательно, его общее влагосодержание выше.

Холодная несущая полоса, как и в модели К. Браунинга, берет свое начало в холодном воздухе под теплым фронтом и переносит холодную воздушную массу из нижней части тропосферы в тыловую часть циклона.

Сухая несущая полоса, или сухое вторжение — это ситуация, когда сухой холодный воздух проникает из нижней части тропосферы и переносится к холодному фронту. Далее он движется в тыловую часть барического образования. Когда сухое вторжение достигает холодного фронта, оно изменяет свое направление так, чтобы быть параллельным фронту.

Однако, как часто бывает, воздух из сухой несущей полосы меняет свое направление. При движении его в верхние слои тропосферы развиваются мощные конвективные ячейки.

Ранее произведенные К. Браунингом исследования механизма несущих полос дали возможность в модели Шапиро — Кейзера изучить процессы облакообразования.

Структура облачности на спутниковых снимках выглядит следующим образом:

- на спутниковом снимке теплая несущая полоса выглядит как антициклонически изогнутая облачная полоса, обычно находящаяся не слитно с другими облаками перед облачной полосой холодного фронта, но отделенная от нее;

- на ИК-изображениях серые оттенки облачной полосы теплого несущего потока меняются от серого до белого;

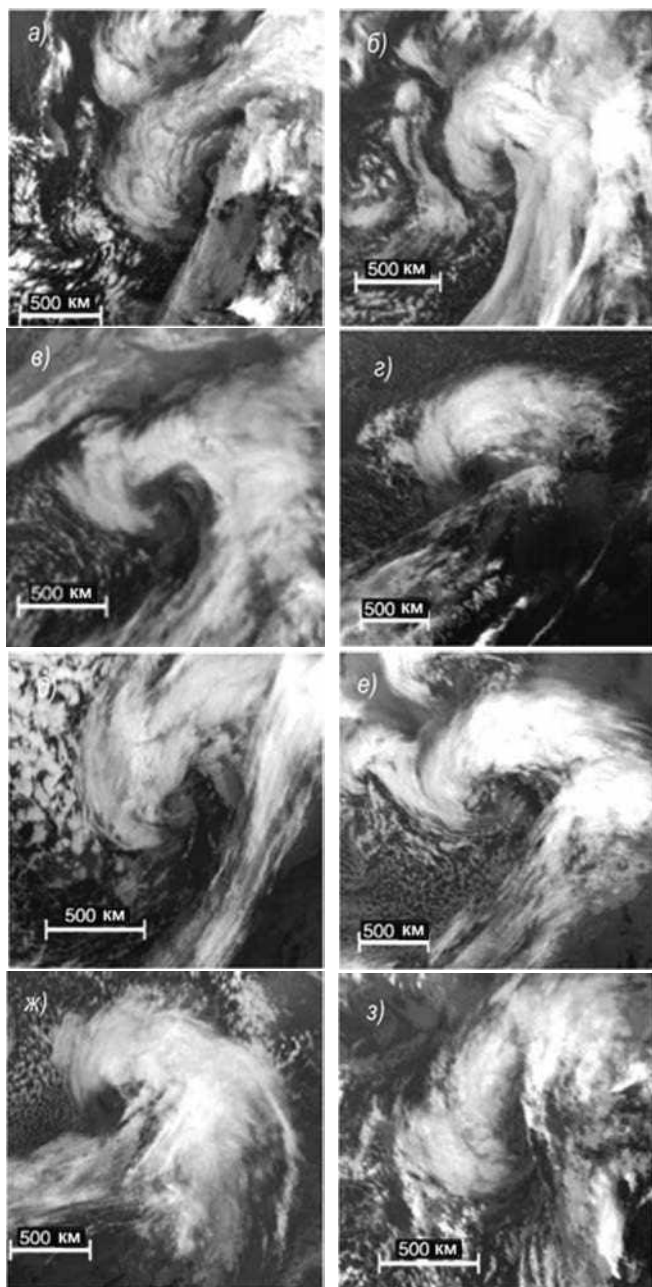


Рис. 4.12. Изображения штормовых циклонов со стинг-джетами.

а) сильный шторм 16.10.1987, б) шторм Oratia 30.10.2000, в) шторм Anna 26.02.2002,
 г) шторм Jeannette 25.10.2002, д) шторм Gudrun 08.01.2005, е) шторм Friedhelm 08.12.2011,
 ж) шторм Ulli 03.01.2012, з) шторм St Jude Storm 28.10.2013.

— облачности в сухом вторжении мало или она состоит из небольших одиночных ячеек;

— облачность восходящей теплой несущей полосы на ИК-изображении имеет серые оттенки, непрерывно становясь ярче в направлении с юга на север или северо-восток, а затем интенсивность снова уменьшается.

Несмотря на то что модель Шапиро — Кейзера довольно точно объясняет физику эволюции циклона, вопрос о природе высокой скорости ветра у холодного фронта оставался недостаточно исследованным. Высокие скорости ветра за холодным фронтом являются результатом воздействия затока воздуха в тыл циклона, они получили название стинг-джет. Ускоряясь, эти потоки резко опускаются к земной поверхности со скоростью до 150 км/ч и выше. При этом стинг-джеты приводят к быстрому охлаждению влажного воздуха, в результате чего происходит конденсация содержащейся в нем влаги с образованием дополнительной фронтальной облачности.

На рис. 4.12 приведены примеры инфракрасных изображений стинг-джетов в циклонах.

Теории Шапиро — Кейзера в 2021 г. исполняется 30 лет, но в отечественной практике дешифрирования облачных полей она до настоящего времени не применяется. Тем не менее статистика показала, что в период с 1989 по 2009 г. из 100 штормовых циклонов в Северной Атлантике примерно одна треть была связана со стинг-джетами.

Глава 5

КОНЦЕПЦИЯ АТМОСФЕРНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДИПОЛЯ

5.1. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ

Согласно волновой концепции образования фронтального атмосферного циклона, разработанной метеорологами норвежской школы в начале XX века, образование циклонов связано с возникновением волны на полярном атмосферном фронте, когда циклоны развиваются в бароклинических зонах атмосферы — на полярных фронтах, захватывая разделенные ими воздушные массы.

Динамическая гипотеза циклогенеза была впервые сформулирована Ганном в 1876 г. Согласно ей циклоны и антициклоны каким-то образом возникают как вихри в общем мощном западном переносе умеренных широт и питаются энергией, которую они получают от основного атмосферного движения. Современная динамическая концепция представлена рассмотренными нами ранее моделями Т. Карлсона, К. Браунинга и моделью жизненного цикла Шапиро — Кейзера. Особенностью последней модели является наличие обособленных восходящих потоков теплых несущих полос и нисходящих потоков холодных несущих полос внутри циклона.

Изучение циркуляционных систем с помощью средств дистанционного зондирования стало возможным после экспериментально установленного факта: каждой стадии развития атмосферного циклона должны соответствовать определенные типы структуры поля облачности. Однако формы облаков, присущие последовательным этапам жизненного цикла, на изображениях, полученных с искусственных спутников Земли в различных диапазонах спектра излучения, не всегда распознаются. Так, циклон в стадии волны на фронте (по облачному полю и по полю ветрового волнения на радиолокационных изображениях) обнаружить можно не всегда. Из теории также известно, что на этапе развития молодого циклона на его холодном фронте ветер должен существенно усиливаться и изменять направление. Однако на радиолокационных изображениях взволнованной морской поверхности заметных перепадов яркости в направлении, перпендикулярном линии фронта, проведенной на синоптической карте, не наблюдается, и установить положение самого фронта на радиолокационном изображении морской поверхности зачастую невозможно. На рис. 5.1 представлена серия изобра-

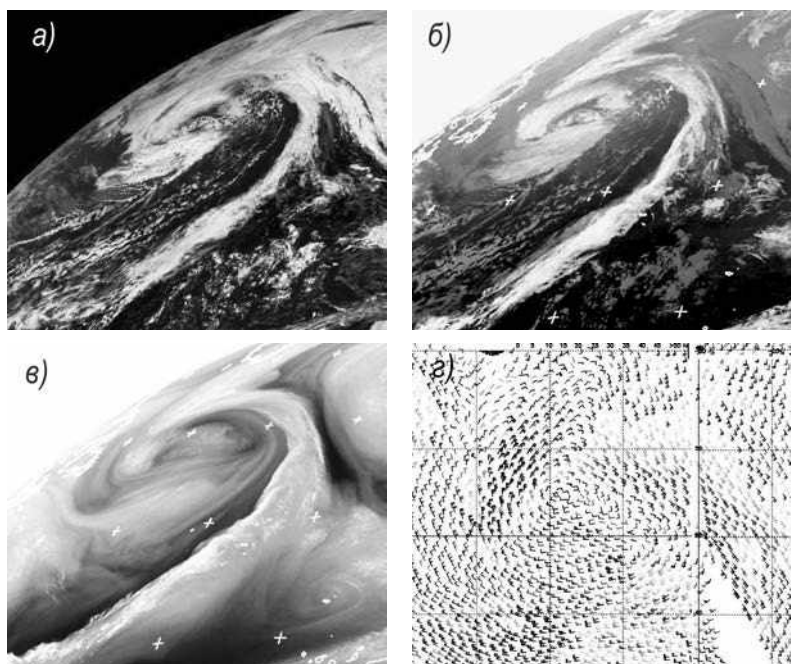


Рис. 5.1. Изображение циклонической циркуляции диполя в разных диапазонах спектра излучения (*а* — *в*) и поле приводного ветра по данным скаттерометра, установленного на спутнике QuikSat (*г*).

а) в видимом диапазоне, *б*) в инфракрасном диапазоне, *в*) в полосе поглощения водяного пара.

жений атмосферного циклона, полученных в разных диапазонах спектра излучения. На снимках видно, что явление «раздваивающегося» холодного фронта четко проявляется на изображении облачного поля в видимом диапазоне (см. рис. 5.1 *а*) и практически не наблюдается в инфракрасном диапазоне (см. рис. 5.1 *б*) и в поле приводного ветра (см. рис. 5.1 *г*).

Наряду с этим на спутниковых изображениях наблюдались такие распределения полей облачности и структур отражения от взволнованной морской поверхности, которые невозможно объяснить ни одной из рассмотренных ранее теорий циклогенеза, в том числе и как волны на полярном фронте. Так, на радиолокационном изображении, полученном с борта космического аппарата «Космос-1500» (рис. 5.2), структура распределения яркости от холодного вторжения в тыл циклона включает два мезомасштабных циркуляционных образования — циклоническое (см. рис. 5.2 *б* вверху) и южнее его антициклоническое, что не наблюдается, например, в поле облачности, полученном в видимом диапазоне (см. рис. 5.2 *а*).

Несоответствие изображения поля облачности по моделям жизненного цикла атмосферного циклона и наблюдаемого с помощью средств дистанционного зондирования структуры облачных полей было отмечено уже

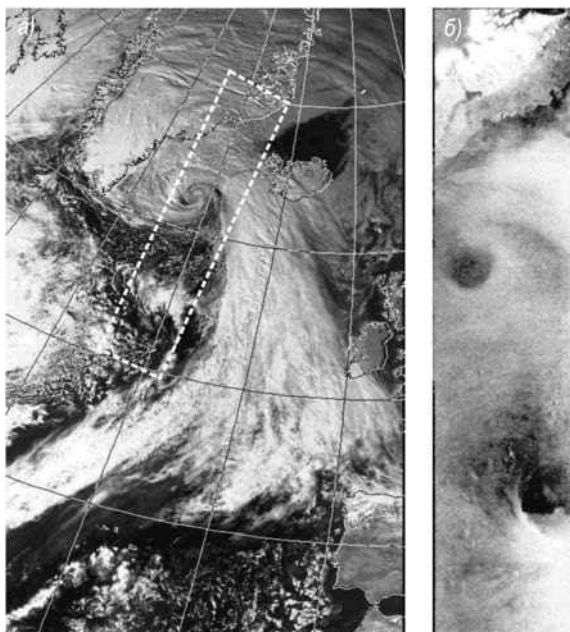


Рис. 5.2. Изображения, полученные с КА «Космос-1500» в видимом диапазоне (а) и радиолокационное изображение (б).

на ранних этапах использования космических снимков в синоптическом анализе. Это несоответствие проявляется в несовпадении картины распределения облачных полей на снимках с состоянием погоды, отмеченным на синоптических картах, или с используемой в синоптической метеорологии символикой как системой примитивов, отображающих на картах погоды происходящие в атмосфере процессы.

Изучение циркуляционных диполей как самостоятельных атмосферных образований началось в середине 80-х годов в Научно-исследовательском навигационно-гидрографическом институте и продолжается в Государственном научном центре Российской Федерации «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт».

Уникальный вид информации получается в полосе поглощения водяного пара. В этом диапазоне на чувствительный элемент датчика дистанционного зондирования поступает собственное излучение водяного пара с верхней границы облаков и потоков влажного воздуха. Это происходит приблизительно в слое от 600 до 300 гПа, поскольку излучение от слоя, расположенного ниже 600 гПа, поглощается в вышележащем слое, который, согласно законам излучения, становится непосредственно излучающей поверхностью. На снимках в указанном диапазоне облачность отображается в виде ярких тонов излучения от воды в жидкой фазе и облаков в виде серых полутонов от водяного пара при различной его концентрации. Темный тон

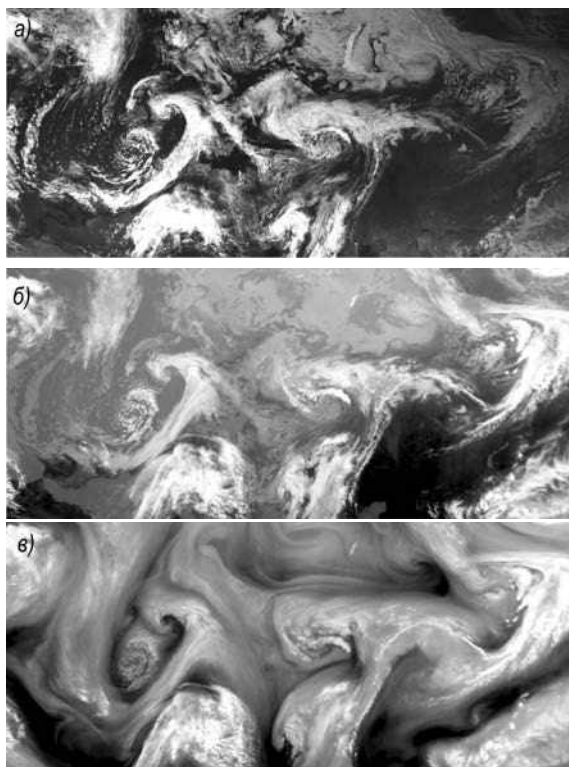


Рис. 5.3. Изображения Северной Атлантики и части Северного Ледовитого океана в разных диапазонах спектра излучения, полученных с борта космического аппарата «Арктика-М».

а) в видимом диапазоне, б) в инфракрасном диапазоне, в) в полосе поглощения водяного пара. соответствует районам с низким содержанием водяного пара. Особенностью снимков, полученных в данном диапазоне, является возможность отображать движение воздушных масс.

На рис. 5.3 приведены снимки, полученные с космического аппарата «Арктика-М» в разных диапазонах спектра излучения. Из сравнения изображений следует, что циркулирующие облачные массы (в нижней части изображения) проявляются во всех диапазонах излучения.

Что касается процесса образования антициклонов как самостоятельных циркуляционных образований, то этому процессу в рассмотренных ранее метеорологических моделях жизненного цикла атмосферного циклона отводится пассивная роль. Отмечалось только, что одновременно с образованием циклонов между ними формируются антициклоны с высоким давлением в центре.

Первое изображение поля облачности, идентифицированное как циркуляционный диполь, было обнаружено на снимках, полученных в инфракрасном диапазоне (рис. 5.4).

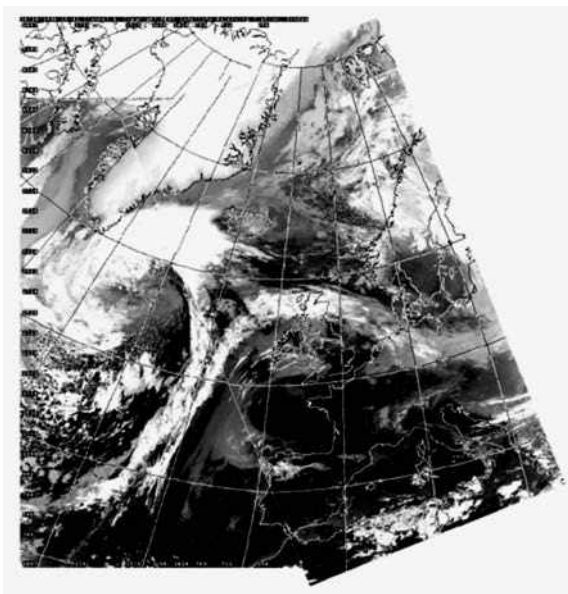


Рис. 5.4. Первое изображение, идентифицированное как циркуляционный диполь, полученное 14 октября 1984 г.

Циркуляционные диполи обнаруживаются как в Северном полушарии, так и в Южном. На рис. 5.5 приведено изображение диполя в полосе поглощения водяного пара, расположенного между Австралией и Антарктидой, причем циклоническая циркуляция наблюдается в правом циркуляционном образовании в отличие от циклона в Северном полушарии.

Интересный снимок с изображением ярко выраженного циркуляционного диполя был получен 12 сентября 2019 г. над территорией Северной Америки. На этом снимке четко прослеживается антициклоническая циркуляция в поле облачности (рис. 5.6).

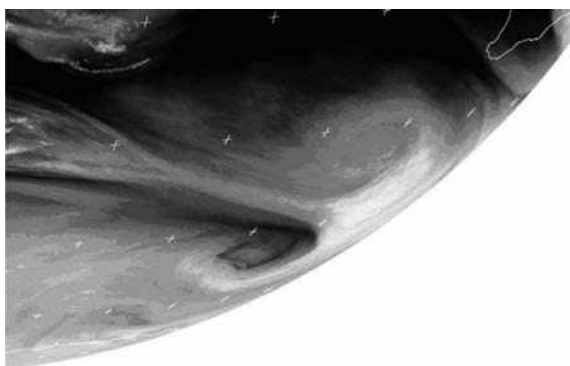


Рис. 5.5. Изображение циркуляционного диполя, расположенного между Австралией и Антарктидой.

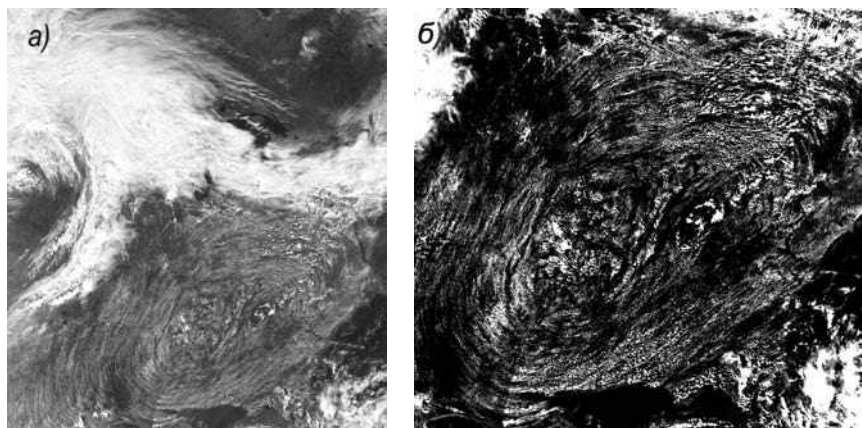


Рис. 5.6. Изображение циркуляционного диполя.

а — общий вид, *б* — фрагмент изображения антициклонической части диполя.

На увеличенном фрагменте снимка (рис. 5.6 *б*) отчетливо видна замкнутая антициклоническая траектория циркуляции воздушной массы в виде окружностей движения облачного поля из конвективных ячеек.

5.2. РАЙОНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ДИПОЛЕЙ

Основным районом возникновения и исследования циркуляционных диполей является акватория северной части Атлантического океана, где были выявлены два направления воздушных потоков, которые приводили к возникновению диполей. Первое направление — с территории Североамериканского континента на Европейский континент, второе — вдоль Гольфстрима с юга на север с поворотом на Европейский континент. Далее сформировавшийся над Северной Атлантикой диполь перемещается в восточном направлении. В многолетних данных четко прослеживается формирование двух циркуляционных зон — исландского минимума и азорского максимума. На Тихом океане зоной образования циркуляционного диполя является тихоокеанское побережье Североамериканского материка.

Первый вариант модели жизненного цикла циркуляционного диполя обсуждался на съезде Русского географического общества в 2010 г. Его схема приведена на рис. 5.7, где цифрами 1—7 обозначены следующие его компоненты:

1) поток интрузии, моделированный с помощью течения Пуазейля с движущимися боковыми и верхней границами и неподвижной нижней границей, создает продольную структуру течений в виде несущих полос: теплого и холодного (2) воздуха вследствие расслоенного по горизонтали и вертикали слоистого течения (см. рис 5.7);

2) фронтальный поток, создающий интрузию в тыл циклона;

3) теплый сектор циклона;

4) циклоническая циркуляция;

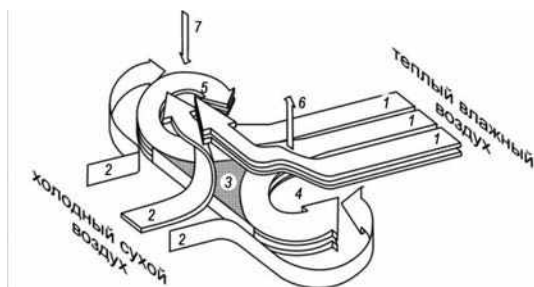


Рис. 5.7. Структура воздушных потоков в первой модели жизненного цикла циркуляционного диполя (1986 г.).

Условные обозначения см. в тексте.

- 5) антициклоническая циркуляция;
- 6) восходящий поток;
- 7) нисходящий поток.

Первая модель описывала жизненный цикл циклона следующим образом. Движущийся в воздушной массе поток (1) под влиянием изменения профиля фронтальной границы раздела «поток — воздушная масса» с клиновидной разделяющей воздушной массой (3) принимает форму циркуляционного диполя: двух взаимосвязанных смежных циркуляционных образований — циклонического (4) и антициклонического (5) с соответствующими приземными зонами: конвергенции в зоне циклона и дивергенции в антициклоне.

В указанном циркуляционном диполе возникают вертикальные движения: восходящие в циклоническом циркуляционном образовании (6) и нисходящие в антициклоническом (7) (для Северного полушария), а также формируются соответствующие высотные зоны: конвергенции над циклоном и дивергенции над антициклоном. Эта модель дает возможность рассматривать циклогенез и фронтогенез как единый неразрывный процесс.

В современной модели жизненный цикл циркуляционного диполя состоит из следующих этапов:

I — деформация воздушного потока при его интрузии в воздушную массу;

II — формирование обратной волны и теплого сектора;

III — формирование циклона, антициклона и теплого сектора;

IV — формирование системообразующих участков.

5.2.1. ПЕРВЫЙ ЭТАП ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДИПОЛЯ

На первом этапе жизненного цикла циркуляционного диполя происходят интрузия в воздушную массу воздушного потока и его трансформация в систему параллельных воздушных струй (потоков), которые своей головной частью формируют границу раздела между передней частью потока и воздушной массой. Схема их формирования приведена на рис. 5.8.

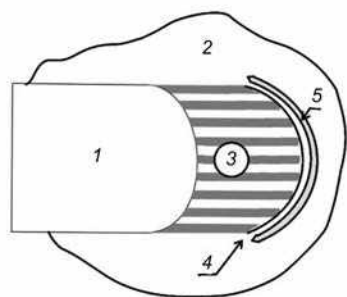


Рис. 5.8. Трансформация интрузии в воздушной массе (вид сверху).

- 1 — интрузия потока; 2 — (внедрение) в воздушную массу;
 3 — ламинарные / турбулентные воздушные потоки (струи или полосы), на которые распадается интрузия; 4 — граница раздела воздушной массы и струй-потоков;
 5 — вытесняемый движущейся границей раздела воздушный вал.

Представим интрузию как находящийся в горизонтальном движении сплошной атмосферный поток, длина которого превосходит ширину или равна ей. На его боковых границах скорость равна нулю, а в центре максимальная. При движении такого потока скорость на его нижней границе будет минимальной из-за трения о подстилающую поверхность. При указанных граничных условиях поток интрузии приобретает свойство неоднородного сдвигового течения Куэтта — Пуазейля. Начальным условием будем считать погружение интрузии в воздушную массу «как есть».

Задача движения такого потока с указанными начальными и граничными условиями была решена Людвигом Прандтлем.

Указанный процесс формирования воздушных потоков описывается законом формирования вихревых слоев Прандтля. Людвиг Прандтль, исследователь в области механики сплошных сред, создатель теории пограничного слоя, в свое время рассмотрел два потока жидкости, имеющих общую границу, движущихся в одном направлении, но с различными скоростями (рис. 5.9 а). В этом случае между потоками создается вихревой

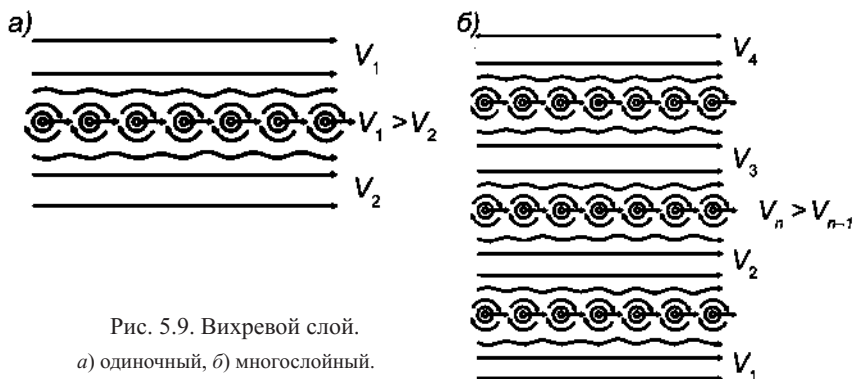


Рис. 5.9. Вихревой слой.
 а) одиночный, б) многослойный.

слой, а на поверхности раздела слоев происходит изменение продольного скачка скорости, которое искривляет поверхность раздела, что приводит к возрастанию разности скоростей.

В такой системе (см. рис. 5.9 а) верхний поток движется быстрее ($V_1 > V_2$), а нижний медленнее, что создает условие *кинетической неустойчивости* в плоском слое. Из тех мест, где давление повышено, жидкость будет перетекать в те места, где давление понижено. В дальнейшем поверхность раздела распадается на последовательность больших и малых вихрей. Эту систему можно рассматривать как систему вихревых нитей, распределенных вдоль поверхности.

Из рис. 5.9 а видно, что система параллельных вихревых нитей формирует поток, который на некотором расстоянии от вихревых нитей имеет такое же поле скорости, как и поток с поверхностью раздела.

Если допустить, что формируется множество поверхностей разрыва потока, то возникает система вихревых (турбулентных) и ламинарных слоев (см. рис. 5.9 б), поэтому можно считать, что в любом случае скорость потока интрузии в сечении должна изменяться от минимального значения ($V_1 = 0$ на рис. 5.9 б) на границе раздела потока и воздушной массы до максимального в центре потока (V_4 на рис. 5.9 б). В этом случае центральный слой движется с наибольшей скоростью. Но по мере удаления слоя от центра к границе раздела скорость слоев должна уменьшаться до скорости слоя, непосредственно контактирующего с воздушной массой.

В этом случае все частицы воздуха в потоке должны двигаться с различной скоростью, однако не могут двигаться со скоростью, изменяющейся в поперечном сечении потока, поскольку такое движение должно в некотором месте разрывать связи между молекулами. Единственным возможным способом перемещения потока при непостоянном распределении скорости в сечении струи является *движение слоями*. На рис. 5.10 приведено изобра-

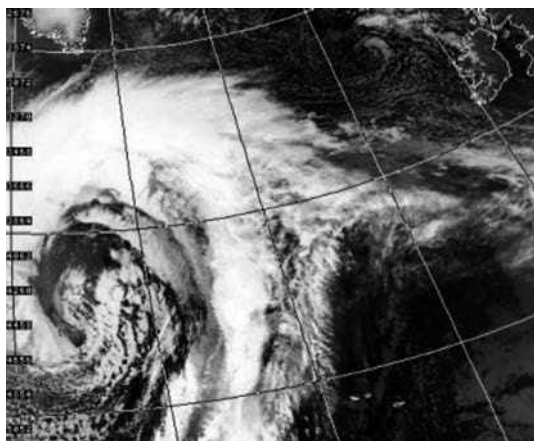


Рис. 5.10. Изображение поля слоистой облачности в циклонической части циркуляционного диполя, обусловленной динамической неустойчивостью.

жение слоев облачности в циклонической части циркуляционного диполя. Из рисунка отчетливо видно расслоение по высоте поля облачности циклона.

Если допустить, что формируется множество поверхностей разрыва потока, то возникает система вихревых (турбулентных) и ламинарных слоев (рис. 5.9 б), которая показывает, что в турбулентном потоке формируются ламинарные слои, как и турбулентные слои разрыва потока.

Таким образом, внедряющаяся в воздушную массу интрузия (1) разбивается на ряд параллельных струй (потоков) (3) (см. рис. 5.7).

Рассмотренный механизм можно принять за процесс формирования воздушных полос при динамической неустойчивости реального атмосферного потока в атмосфере.

Аналогичная ситуация наблюдается и при термической неустойчивости воздушной массы, когда холодный арктический воздух с ледяного массива натекает на более теплую водную поверхность (рис. 5.11). В этом случае происходит формирование конвективных облачных полос, четко прослеживаемых на космическом снимке, представленном на рис. 5.11 а.

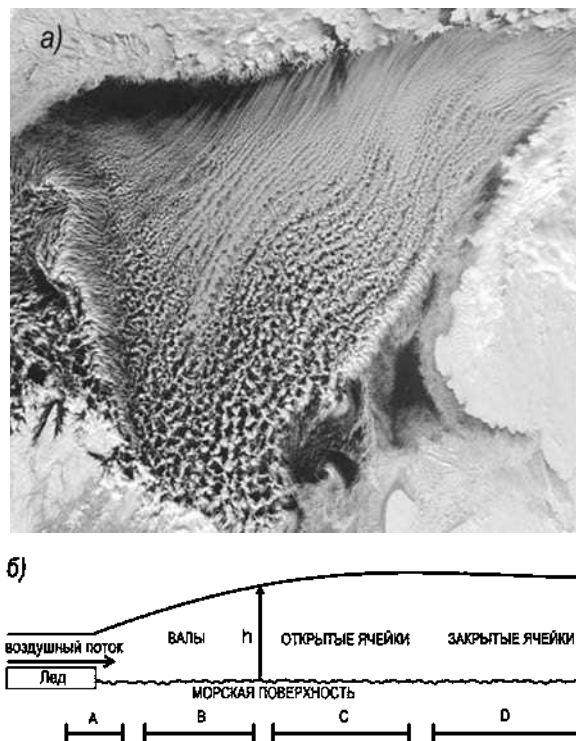


Рис. 5.11. Образование конвективных облачных полос при затопе холодной воздушной массы с арктического льда на более теплую поверхность океана.

а) изображение поля облачности, б) схема сечения вдоль потока.

Практика показала, что реальные размеры слоев, на которые происходит расщепление интрузии потока, могут составлять 6—7 км.

Если провести сечение вдоль направления скорости ветра (см. рис. 5.11 б), то можно выделить четыре зоны, характеризующиеся разными значениями отношения ширины полос к их высоте:

зона *A*: $\lambda/h \approx 2,8$ и $h \approx 1$ км;

зона *B*: облачность в виде валов с $\lambda/h \approx 6 \dots 7$;

зона *C*: открытые конвективные ячейки с $\lambda/h \approx 15$ и $h \approx 2,25$ км;

зона *D* состоит из закрытых конвективных ячеек с $\lambda/h \approx 30$ и $h \approx 1,25$ км.

Таким образом, воздушный поток с нелинейным поперечным профилем скорости разбивается на ряд струй (полос), перемещающихся в одном направлении, но с различными скоростями — максимальной в центре и равной нулю на границе раздела со средой (см. рис. 5.9).

В основе рассматриваемой модели движения потока и формирования атмосферного циркуляционного диполя лежит гипотеза о том, что переменный поперечный профиль скорости потока интрузии создает фронтальное квазипрепятствие — подвижную границу раздела фронта интрузии и воздушной массы, в которую он вторгается.

5.2.2. ВТОРОЙ ЭТАП ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДИПОЛЯ

На втором этапе жизненного цикла циркуляционного диполя происходит формирование обратной волны.

Схема формирования элементов циркуляции на втором этапе жизненного цикла циркуляционного диполя показана на рис. 5.12.

При натекании струйного потока, движущегося со скоростью большей, чем скорость перемещения фронтальной границы раздела поток — воздушная масса, наблюдается явление «обратной волны» (6 на рис 5.12). Явление известно в практической гидродинамике также под названиями «отбойное течение», «тягун», «разрывное течение», «отбойная волна». Обратная волна

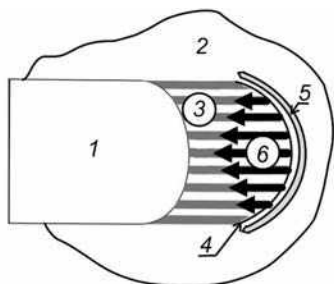


Рис. 5.12. Образование обратной волны на втором этапе формирования циркуляционного диполя.

1 — интрузия, внедренная в воздушную массу; *2*; *3* — ламинарные / турбулентные воздушные потоки (полосы), на которые распадается интрузия; *4* — граница раздела воздушная масса — потоки; *5* — вытесняемый движущейся границей раздела воздух; *6* — обратная волна.

представляет собой волну с направленными противоположно потоку фазовой и групповой скоростями. Процесс возникновения обратной волны можно пояснить на примере внезапной остановки потока автотранспорта. Представим себе автодорогу, имеющую несколько полос движения, в часы «пик», когда автомобили движутся сплошным потоком по своим полосам движения, и внезапно остановившуюся в среднем ряду машину. За ней одна за другой начнут останавливаться едущие сзади автомобили, но скорость распространения остановки машин будет направлена против направления движения потока — это и есть механизм обратной волны. То же будет наблюдаться во всех полосах движения. Если указанный механизм применить к движению отдельных воздушных потоков, движущихся с разной скоростью, то необходимо будет учесть скорости потоков. С максимальной скоростью будет двигаться центральный поток, а с минимальной — поток, расположенный ближе к боковым границам.

5.2.3. ТРЕТИЙ ЭТАП ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДИПОЛЯ

Третий этап — становление основных объектов атмосферного диполя — теплого сектора, а также циклона и антициклона. Схема третьего этапа формирования циркуляционного диполя приведена на рис. 5.13 и демонстрирует деление потока обратной волной на два циркуляционных образования: циклоническое и антициклоническое. После отражения от границы раздела 4 сформировавшийся клин 6 расщепляет общий поток и направляет его по двум направлениям — циклоническому и антициклоническому. Зона обратной волны является теплым сектором 6 атмосферного циклона. Указанные закономерности объясняют возникновение циркуляционного диполя и действия правила Бейс-Балло, которые описывают формирование вертикальных движений циркуляционных потоков — циклонического и антициклонического.

В общем виде закономерность формирования вертикальных движений воздушных потоков в циркуляционном диполе выражается следующим образом (см. рис. 5.13):

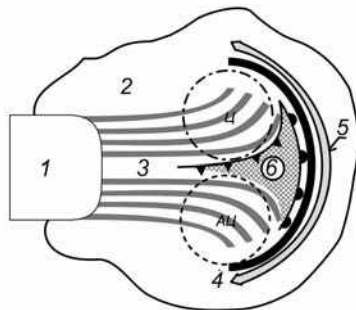


Рис. 5.13. Третий этап формирования циркуляционного диполя.

1 — интрузия воздушного потока в воздушную массу 2; 3 — линии тока воздушных потоков, 4 — граница раздела фронта потоков и воздушной массы, 5 — область струйного течения, огибающего воздушный потоки, 6 — обратная волна (зона сопротивления атмосферы движению диполя).

1) если в Северном полушарии возникает область циркуляции, направление вектора вращения которой совпадает с направлением вектора вращения Земли, то в такой области возникают восходящие потоки;

2) если в Северном полушарии возникает область циркуляции, вектор вращения которой направлен в противоположную по отношению к направлению вектора вращения Земли сторону, то в такой области возникают нисходящие потоки;

3) если в Южном полушарии возникает область циркуляции, направление вектора вращения которой совпадает с направлением вектора вращения Земли, то в такой области возникают нисходящие потоки;

4) если в Южном полушарии возникает область циркуляции, вектор вращения которой направлен в противоположную по отношению к направлению вектора вращения Земли сторону, то в такой области возникают восходящие потоки.

5.2.4. ЧЕТВЕРТЫЙ ЭТАП ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДИПОЛЯ

Четвертый этап жизненного цикла циркуляционного диполя — формирование системообразующих участков. Его принципиальная схема приведена на рис. 5.14.

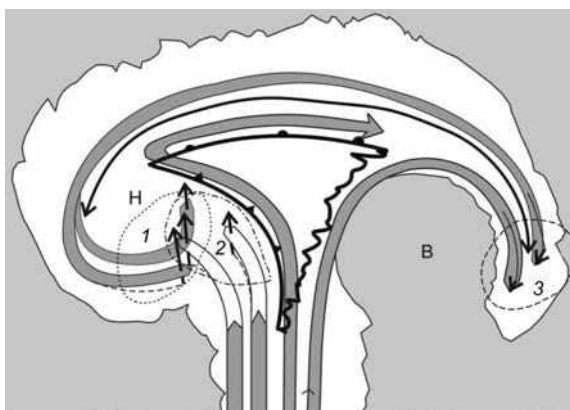


Рис. 5.14. Четвертый этап формирования циркуляционного диполя.

1 — зона формирования потока в тыл циклона (стинг-джета), 2 — зона формирования восходящих движений как следствие циклонического движения потока на сферической поверхности Земли, 3 — зона формирования нисходящих потоков как следствие антициклонического движения потока на сферической поверхности Земли.

5.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОТДЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДИПОЛЯ

Ранее было отмечено, что физическое моделирование природного явления в его естественных размерах невозможно. Тем не менее физическое моделирование отдельных процессов известно с древнейших времен и осуществляется до настоящего времени.

В качестве примера рассмотрим результаты моделирования А.Я. Миловичем поведения водного потока на изгибе его траектории. Для изучения поведения потока им в 1914 г. был сконструирован и построен специальный лоток. Лоток был изготовлен из парафина, налитого в основу из толстых деревянных досок, имел прямоугольное поперечное сечение и был выполнен с поворотом в 180° посередине с примыкающими к нему длинными прямолинейными входной и выходной частями. Лоток был помещен в железный клёпаный бак, снабженный приспособлениями для привода и отвода воды. Привод воды выполнялся с помощью трубы, выходявшей из верхнего бака, где большой водослив мог хорошо удерживать на постоянной высоте верхний уровень жидкости для получения постоянного напора, а рукав трубы погружался в успокоитель приводного бассейна.

Во избежание появления боковых скоростей и неодинакового движения жидкости при входе в канал входное отверстие было затянуто двумя металлическими сетками, а далее все струи потока выпрямлялись еще и тонкими металлическими трубками длиной 150 мм, перегораживавшими все сечение струи жидкости до ее верхнего уровня.

В качестве трассеров движения потока использовалась чертежная тушь, которая выливалась в движущуюся жидкость и оставляла след на бумаге, покрывающей дно. В результате становилась видна траектория потока на уровне дна. Пример записи приведен на рис. 5.15 а.

На рис. 5.16 а виден след краски, выпущенный на дно потока. На рис. 5.16 б изображены совместно выпущенные придонный поток краски и поверхностный поток красящего порошка.

Для наблюдения придонного потока выпускалась по дну правого приводного канала (см. рис. 5.16 а) в поток краска (обычная чертежная тушь). Краска, выпущенная в поток, размываясь и увлекаясь им, дала картину, представленную на рис. 5.16.

Первая фотография показывает, что вся краска со дна приводного канала как бы «всасывается стенкой внутреннего закругления канала, а затем

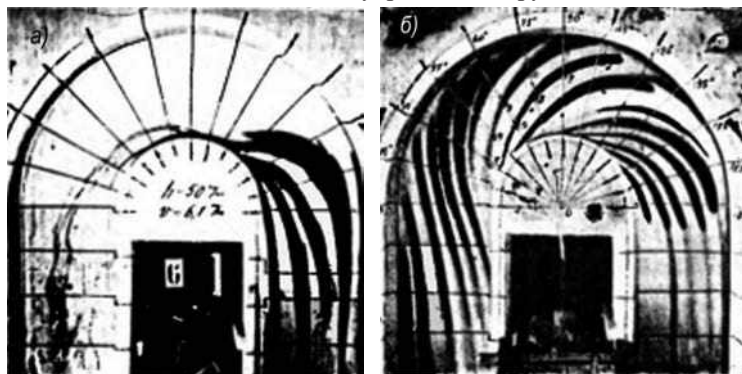


Рис. 5.15. Фотографии записи эксперимента А.Я. Миловича.

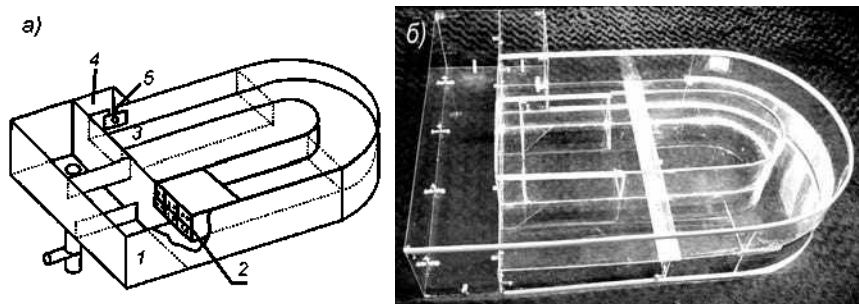


Рис. 5.16. Усовершенствованный макет лотка Миловича.

Патент на изобретение № 2773548.

а) схема конструкции, *б)* фотография макета.

ею же и выбрасывается, но уже за закруглением и притом так, что на само закругление краска не попадает.

Так было экспериментально подтверждено, что движение по изгибу канала создает вращение потока жидкости и, следовательно, в зависимости от направления изгиба (вправо или влево) возможно различное направление прецессии потока — вверх или вниз.

Макет Миловича позволял видеть движение потоков только как след на дне и на поверхности и не давал возможности наблюдать трехмерное распределение потоков.

Для устранения этого недостатка автором настоящей монографии в 2021 г. был повторен опыт Миловича, для чего из оргстекла был изготовлен прозрачный макет лотка (рис. 5.16) и в его конструкцию внесены существенные для патентования дополнения, предназначенные для наблюдения трехмерной структуры потоков. Вместо краски в качестве трассеров использовалась красная тонкая нить, помещаемая в различных частях входящего потока.

В начале входного участка 1 установлена решетка 2, в центр ячеек которой в жидкость помещают трассер — шелковая нить. Поскольку прямоугольный входной и поворотный участки выполнены из прозрачного материала, обеспечивается возможность наблюдения положения трассера внутри потока.

Кроме того, на боковой стороне конечной части 3, соединенной с выходной камерой 4, сделан вертикальный вырез 5, частично закрывающийся подвижной кулисой с фиксатором ее положения в вырезе, что дает возможность регулировать скорость потока.

Результаты моделирования показаны на рис. 5.17.

Результаты моделирования показали, что положения трассеров, запущенных с нижнего и верхнего ряда, совпадают на всех расстояниях от левой границы приводного канала (1, 2, 3). Этим фактом подтверждается, что краска как бы «прилипает» к внутренней стенке закругления.

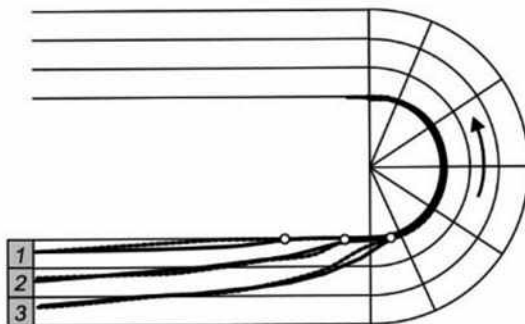


Рис. 5.17. Результаты моделирования потоков на усовершенствованном лотке Миловича (вид сверху).

После рассмотрения концепций жизненного цикла фронтальных атмосферных циклонов можно сравнить этапы их жизненного цикла (табл. 5.1) по единой схеме: зарождение, этап максимального развития, распад.

Таблица 5.1

Этапы циклофронтогенеза в моделях жизненного цикла атмосферного циклона

Этап	Норвежская модель циклона	Модель циклона Шапиро — Кейзера	Модель циркуляционного диполя
I	Стадия волны	Стадия волны	Формирование границы раздела поток — воздушная масса
II	Молодой циклон	Фронтальный перелом	Формирование обратной волны
III	Развитый циклон	Формирование фронтальной Т-структуры	Формирование теплого сектора, а также циклона и антициклона
IV	Стадия окклюдирования	Формирование изолированной теплой области (секлюзии)	Стадия максимального развития

В отличие от норвежской модели и модели Шапиро — Кейзера модель циркуляционного диполя рассматривает трансформацию не одного (циклонического), а двух циркуляционных образований — циклона и антициклона.

Таким образом, результаты изложенных исследований позволяют принять их в качестве модели процесса формирования атмосферного циркуляционного диполя.

Модель циркуляционного диполя позволяет интерпретировать формирование циклонического и антициклонического движения при интрузии в тыл циклона, считая холодный фронт границей раздела стингг-джета и теплого сектора.

Глава 6

АРКТИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ

6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Изучение мезомасштабных циркуляционных атмосферных образований началось с использованием метеорологических искусственных спутников Земли. Одна из первых официальных рекомендаций по их названию была дана европейской рабочей группой по полярным циклонам в 1994 г.: «Термин “полярный мезомасштабный циклон” (полярный мезоциклон) — это общий термин для всех α - и β -мезомасштабных циклонических вихрей к северу от главного полярного фронта (горизонтальный масштаб 20—2000 км). Термин “полярный циклон” должен использоваться для интенсивных морских мезоциклонов с масштабами до 1000 км и скоростью ветра в приповерхностном слое более 15 м/с».

Напомним, что циклонические образования мезомасштаба делятся на три подкатегории в зависимости от размера атмосферного вихря и продолжительности его жизненного цикла:

α : размер 200—2000 км, время жизненного цикла от 6 часов до двух дней; линия шквалов; синоптический масштаб от 1000 км;

β : размер 20—200 км, время жизненного цикла от 30 минут до 6 часов; атмосферная конвекция возле озер, когда очень холодный воздух проходит над открытой водой зимой, и т. д.

γ : размер 2—20 км, время жизненного цикла 2—30 минут; явления, которые приводят к формированию конвективных облаков (ливни и грозы), такие как дифференциальное потепление на краях облаков, сложные горные воздушные потоки и т. д.

Большой диапазон мезомасштабных вихрей с горизонтальным размером до 1000 км, возникающих в сторону полюса от основного полярного фронта или других основных фронтальных зон, покрывает значительное число погодных систем — от незначительных, слабых вихрей практически без поверхностной циркуляции до исключительно активных систем, сопровождаемых ураганными ветрами и мощными осадками, полярных циклонов.

Для ранних этапов изучения мезомасштабных вихрей *характерно рассмотрение отдельных случаев, основанное на визуальном анализе инфракрасных изображений облачного покрова.*

Низкая предсказуемость — одна из основных проблем прогноза полярных мезоциклонов. Объективные трудности прогноза их формирования определяются их характерными особенностями (незначительные размеры и короткий срок жизни), усугубляются дефицитом данных стандартных метеорологических наблюдений на арктических акваториях и не всегда имеющейся возможностью оперативного получения спутниковой информации с достаточным временным разрешением. Отсутствие модели жизненного цикла мезоциклонов также не способствует повышению точности прогноза. На первом этапе прогноз образования основывается на общем прогнозе синоптического положения. Прогнозирование затoka холодного воздуха на морскую поверхность в приполярных широтах хорошо оправдывается при краткосрочном прогнозе (72 часа).

Позднее определение было уточнено: полярный циклон — это небольшой, но довольно интенсивный морской циклон, который формируется *к северу от основной бароклининой зоны* (полярного фронта или другой основной бароклининой зоны). Горизонтальный масштаб полярного циклона находится примерно между 200 и 1000 км и скорость ветра в приповерхностном слое ≥ 15 м/с.

С интенсивными арктическими циклонами связаны экстремальные погодные условия, штормовой ветер, обледенение судов и сооружений, снежные заряды.

Полярные мезомасштабные циклоны (полярные мезоциклоны) стали усиленно изучаться с начала шестидесятых годов. В это время термин «полярный циклон» уже укоренился в норвежской модели жизненного цикла среднеширотного атмосферного циклона, и для нового объекта стали примерять различные определения. Был апробирован следующий ряд терминов:

- полярный мезоциклон,
- арктическая депрессия,
- глубокая спираль,
- «карусель» или кольцо вихрей,
- полумесяц,
- овальная, твердая масса,
- множественные глубокие полосы,
- ряд неглубоких полос,
- одиночная глубокая полоса,
- одиночная неглубокая полоса,
- взрывные,
- штормовые полярные циклоны,
- вторичные циклоны,
- завихренности,
- системы реверсивной кривизны,
- барические ложбины,

- фронты в погранслое,
- холодные депрессии (включая вихревые системы),
- облачные запятые,
- бароклинные волны — системы прямых сдвигов,
- орографические полярные циклоны

Такой разноречивой в названиях вызван объективно существующей проблемой наблюдения мезоциклонов.

6.2. ПРОБЛЕМА НАБЛЮДЕНИЯ

В основе данной проблемы лежит неопределенность в идентификации этапов жизненного цикла мезоциклона в момент съемки с космического аппарата дистанционного зондирования, и прежде всего соотношения его периода обращения и времени жизненного цикла. В результате съемка непрерывного жизненного цикла производится как минимум через интервал, равный по длительности периоду обращения космического аппарата. В этом случае мы никогда не можем однозначно определить, какому этапу жизненного цикла мезоциклона соответствует полученный снимок, и даем название видимой структуре поля облачности по своему усмотрению.

Эту проблему можно образно представить, вспомнив известный мультфильм, как «эффект ежика в тумане», когда из сплошного тумана внезапно появляются и исчезают изображения различных животных. В нашем случае, снимая изображения облачных полей, мы внезапно видим различные мезоструктуры, которые не складываются в стройную картину жизненного цикла атмосферных процессов.

Различные базы данных полярных мезоциклонов включают изображения и картографический материал, но не содержат указания на этап его жизненного цикла. Приведем примеры записи из Справочного пособия по полярным мезомасштабным циклоническим вихрям (Луценко и Лагуна, 2010) в атмосфере Арктики.

Пример 17 (6—7 февраля 1997 г.)

После прохождения полярнофронтального циклона в восточном направлении в тыловой его части, над Баренцевым морем, сформировались потоки северного и северо-восточного направлений, что проявилось в ориентации облачных гряд повышенной конвекции (рис. 6.1). В средней тропосфере преобладал северный и северо-западный воздушный перенос. На следующие сутки интенсивный полярный мезоциклон наблюдался в юго-восточной части Баренцева моря у кромки массива дрейфующих льдов (рис. 6.2 а). Диаметр его облачного вихря (около 500 км) был сравним с размером соответствующей области низкого давления на уровне моря (рис. 6.2 б). В центре мезовихря зарегистрировано довольно низкое значение давления (985 гПа). Максимальное падение давления в районе ПМЦ составило 4,1 гПа за три часа, ветер усиливался до 20 м/с, срок жизни этого циклонического возмущения составил менее 12 часов.

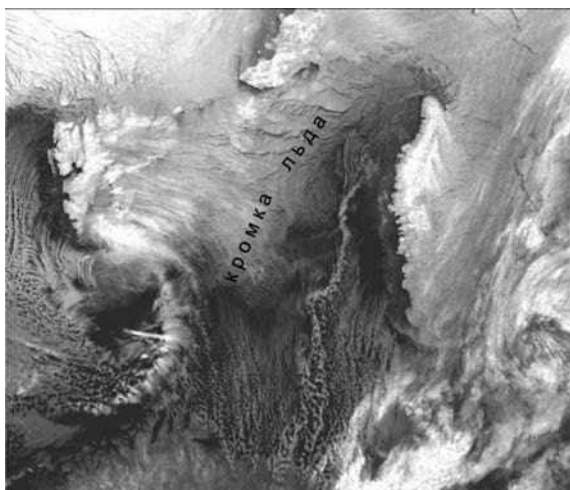


Рис. 6.1. Снимок с ИСЗ NOAA-14 за 06 ч 33 мин 6 февраля 1997 г. из справочного пособия.

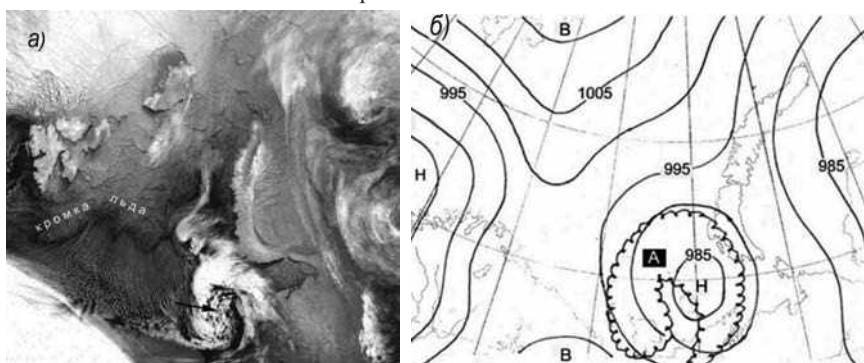


Рис. 6.2. Облачный вихрь полярного мезоциклона в районе Баренцева моря на снимке с ИСЗ NOAA-14 (указан стрелкой) за 06 ч 22 мин 7 февраля 1997 г. (а) и его положение в поле давления на уровне моря (А) за 12 ч 7 февраля 1997 г. (б).

Пример 18 (1—2 марта 2001 г.)

На рис. 6.3 прослеживаются первые признаки мезомасштабного циклогенеза — образование слабо развитых облачных мезовихрей над восточной частью Баренцева моря непосредственно у ледовой кромки. В дальнейшем формирование интенсивного полярного мезоциклона в этом районе (рис. 6.4 а) происходило в барической ложбине на фоне относительно высокого давления на уровне моря (рис. 6.4 б). При прохождении над о-вом Новая Земля и смещении на Карское море, покрытое льдом, мезовихрь разрушился, и через сутки на спутниковом снимке просматривались лишь отдельные облачные фрагменты. При перемещении полярного мезоциклона на акваторию Карского моря по данным станции Малые Кармакулы отмеча-

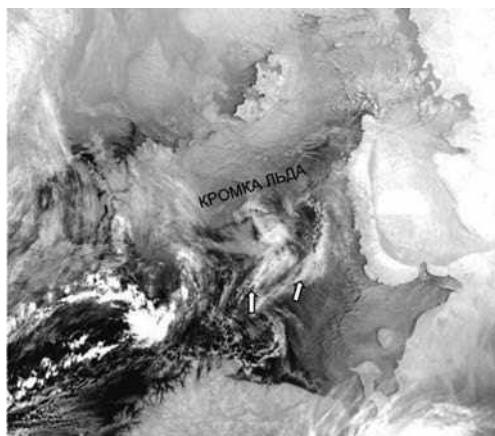


Рис. 6.3. Облачные циклонические мезовихри в районе Баренцева моря (показаны стрелками) на снимке с ИСЗ NOAA-14 за 09 ч 33 мин 1 марта 2001 г.

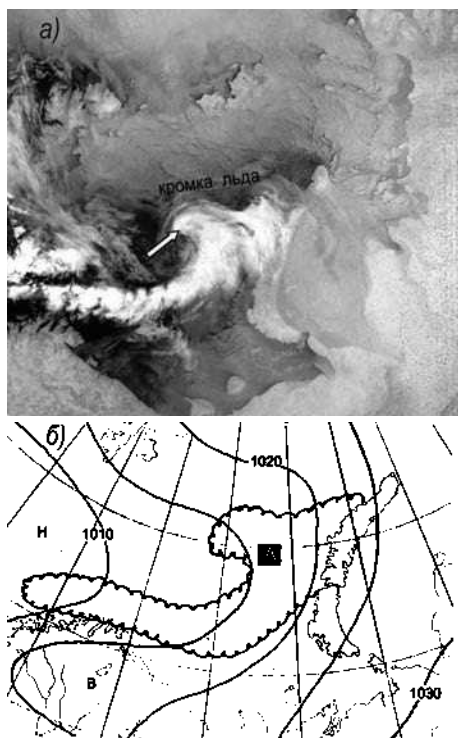


Рис. 6.4. Облачный вихрь полярного мезоциклона в районе Баренцева моря (показан стрелкой) на снимке с ИСЗ NOAA-14 за 07 ч 41 мин 2 марта 2001 г. (а) и его положение (обозначено буквой А) в поле давления на уровне моря за 12 ч 2 марта 2001 г. (б).

лась штормовая погода с усилением ветра до 25 м/с. Облачный мезовихрь полярного мезоциклона просуществовал около суток и не был отражен на синоптических картах в поле давления на уровне моря как отдельное барическое образование.

Продолжим рассмотрение проблемы наблюдения. Устранить указанную выше неопределенность до настоящего времени технически было невозможно. Создание модели жизненного цикла на основе малых выборок, получаемых в результате пассивного эксперимента, также затруднительно. В теории наблюдения малыми выборками обычно считают выборки объемом $n \leq 30$, к которым нельзя применить классические формулы статистического анализа, действующие асимптотически при $n \rightarrow \infty$. Эти данные нельзя относить к малым выборкам, поскольку при съемке с борта космического аппарата неизвестно, какой этап жизненного цикла циклонического образования в данный момент наблюдается. В нашем случае мы имеем малые выборки и много вариантов вместо точных значений показателя и меньшего число вариантов.

Таким образом, доступный объем выборки и механизм объединения данных разных опытов отсутствует. Эта ситуация относится и к статистике о детальной внутренней структуре мезоциклонов, так как они наблюдаются практически только над океанами, где сеть метеорологических измерений недостаточно плотная для их систематического изучения. *Как известно из опыта, статистика верна, когда данных много.* Сделать косвенные выводы о внутренней динамике мезоциклонов на основании спутниковых снимков облачного покрова также не всегда удастся. Наличие облачного покрова свидетельствует о том, что в полярных мезоциклонах существенную роль играют конвективные процессы (облачные системы состоят преимущественно из конвективных облаков). Обобщая данные о сходстве и различиях мезомасштабных вихрей и атмосферных циклонов синоптического масштаба, полученные различными авторами на основании анализа отдельных случаев, можно заключить, что часть таких вихрей, особенно с облачной системой в виде запятой, имеют строение, в целом сходное со строением фронтального циклона.

Однозначно можно предположить, что одним из механизмов формирования мезоциклонов служит линия пересечения потоков холодного воздуха над водной поверхностью.

6.3. МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

В большинстве исследований указывается, что благоприятными условиями для формирования арктических циклонов является адвекция холодного воздуха из полярных широт на относительно теплую водную поверхность. Возникающие при этом потоки тепла и влаги способствуют формированию циркуляционного диполя с мезомасштабным циклоническим вихрем. Однако необходимо помнить, что само по себе движение холодных

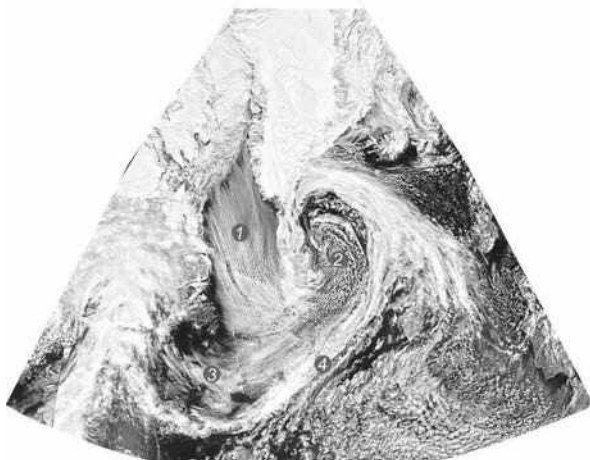


Рис. 6.5. Изображение первичного арктического циклона.

воздушных масс над теплыми океаническими водами не ответственно напрямую за циклогенез. Оно лишь служит причиной установления условий, благоприятных для формирования арктических циклонов и мезовихрей в ответ на другие внешние воздействия. В основе механизмов, ответственных за образование мезовихрей, лежат как бароклинные, так и конвективные процессы; при этом и те, и другие могут быть вовлечены в жизненный цикл одного единственного полярного циклона.

В настоящем исследовании применяется термин «арктический циклон» к циклоническим образованиям, формирующимся за счет механизма термической неустойчивости при перемещении холодной арктической воздушной массы с массива арктического льда на относительно теплую водную поверхность. В этом случае образуются первичные и вторичные циклонические структуры, формирующиеся по правилу образования циркуляционного диполя, рассмотренного ранее. Указанное правило распространяется на все процессы интрузии любого потока в воздушную массу следующим образом:

- 1) воздушный поток, внедряясь в воздушную массу, разбивается на продольные струи;
- 2) движущийся в воздушной массе струйный поток формирует обратную волну;
- 3) эта обратная волна образует два циркуляционных направления вращения струй: циклоническое и антициклоническое;
- 4) струи циклонического вращения приобретают восходящее движение, образующее область пониженного давления;
- 5) струи антициклонического вращения приобретают нисходящее движение, образующее область повышенного давления.

Таким образом, любой интрузивный поток формирует циркуляционный диполь.

Первичные арктические циклоны формируются как циркуляционный диполь (циклон и антициклон) непосредственно затоком воздуха с охлажденной поверхности.

Изображение вторичных арктических циклонов приведено на рис. 6.6.

Вторичные арктические циклоны формируются как заток холодного воздуха в тыловую часть синоптических циклонов или в антициклоны. Их изображения приведены на рис. 6.6.

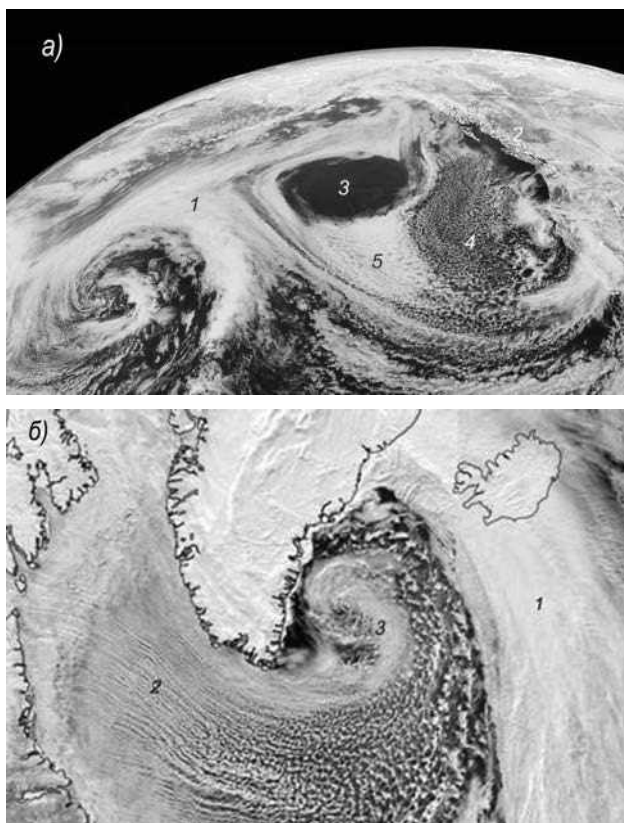


Рис. 6.6. Изображение вторичных арктических циклонов.

1 — заток охлажденного воздуха с Североамериканского континента на водную поверхность северной части Атлантического океана; 2 — циклон; 3 — антициклон; 4 — граница между циркуляционным диполем и воздушной массой, в которую произошло внедрение.

На рис. 6.6 *a* показано, что поток холодного воздуха с Североамериканского континента (2) проникает в антициклон циркуляционного диполя (1) и формирует вторичный циркуляционный диполь с антициклоном (3), создающим сильный нисходящий поток, циклоническим вращением воздуха (4), имеющим восходящее движение (3), и Δ -образной областью (5), являющейся аналогом теплого сектора в норвежской модели.

Из рис. 6.6 б видно, что поток холодного воздуха с Североамериканского континента (2) проникает на акваторию Атлантического океана, образует стрим-джет (3), зона которого внедряется в тыл холодного фронта первичного циркуляционного диполя (1) с группой мезовихрей (3).

6.4. ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕЗОЦИКЛОНОВ

Дальнейшее изучение условий возникновения и эволюции арктических мезомасштабных циклонов связано с определением их жизненного цикла. В настоящее время это возможно только с использованием космических систем на высокоэллиптических орбитах. Два космических аппарата «Арктика-М» в составе орбитальной группировки высокоэллиптической гидрометеорологической космической системы обеспечат мониторинг облачных полей практически в реальном масштабе времени (с интервалом 15 минут).

Космический аппарат «Арктика-М» является уникальным для мировой орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли. Спутник находится на высокоэллиптической орбите с апогеем 40 000 км и позволяет выполнять мониторинг арктического региона Земли, недоступного для наблюдения с геостационарных орбит. Снимок Северной Атлантики и полярной области, полученный с космического аппарата «Арктика-М», приведен на рис. 6.7. 15-минутная периодичность съемки обеспечит определение жизненного цикла всех видов полярных мезовихрей.

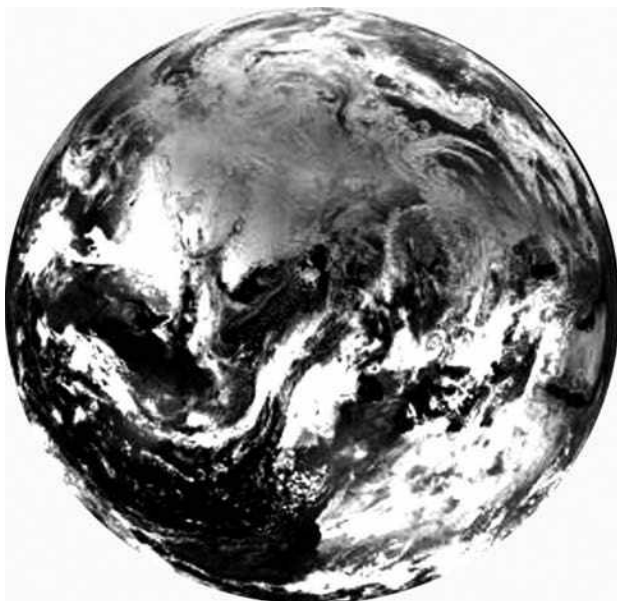


Рис. 6.7. Изображение в видимом диапазоне, полученное с космического аппарата «Арктика-М».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синоптическая метеорология и физика атмосферы претерпели существенные изменения с того времени, когда были запущены первые искусственные спутники Земли.

За более чем полувековой период систематического формирования спутниковой синоптической метеорологии как самостоятельной научно-прикладной дисциплины стало очевидным, что без использования концептуальных моделей атмосферных циклонов дешифрирование снимков, полученных с метеорологических искусственных спутников Земли, невозможно.

Несмотря на то что в состоянии наших знаний о циркуляционных атмосферных образованиях имеются значительные бреши, очевидно, что в этой области достигнут значительный прогресс. Современные достижения в метеорологии и смежных дисциплинах обязаны развитию методов наблюдений. Как показало время, каждое введение в практику наблюдений новых технических средств наблюдения дает приращение новыми знаниями.

В силу сложившихся в СССР условий единственной моделью жизненного цикла атмосферных циклонов стала волновая модель. На ее основе были созданы все юридически значимые руководящие документы, относящиеся к оперативному гидрометеорологическому обеспечению и прогностической деятельности. При этом разработка новых методов освещения гидрометеорологической обстановки на основе анализа изображений поля облачности не поспевает за изменением потребностей гидрометобеспечения малоосвоенных регионов, таких как Арктика.

В настоящей монографии изложены следующие слабо освещенные в отечественной научной литературе современные модели жизненного цикла атмосферных циклонов, построенные на основе анализа изображений поля облачности, полученных с помощью искусственных спутников Земли:

- трехмерные модели Т. Карлсона и М. Браунинга,
- модель Шапиро — Кейзера,
- модель циркуляционного диполя,
- модель арктического циклона.

Однако, для того чтобы окончательно понять природу процесса циклофронтогенеза, а вместе с этим природу облакообразования и описать этот процесс, необходимы дальнейшие исследования, опирающиеся на изложенные концептуальные модели.

Автор будет благодарен читателям, приславшим свои замечания и предложения по книге по электронной почте vvs@aari.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамович К.Г.* Условия образования низких облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 122 с.
- Бержсерон Т.* Трехмерно-связный синоптический анализ. В 2 томах / Пер. с нем. Под ред. С.П. Хромова. М.: изд-во Центр. управления Единой гидрометслужбы СССР, 1934. 300 с.
- Боровиков А.М., Гайворонский И.И., Зак Е.Г.* и др. Физика облаков / Под ред. А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 459 с.
- Борисенков Е.П., Базлова Е.П., Ефимова Л.К.* Перистая облачность и ее влияние на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 119 с.
- Бугаев В.А.* Техника синоптического анализа и прогноза. Л.: Гидрометеиздат, 1947. 252 с.
- Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.* Мезометеорологические процессы. Учебное пособие. М.: изд-во МГУ, 2006. 101 с.
- Воробьев В.И.* Основные понятия синоптической метеорологии. СПб: изд-во РГТМУ, 2003. 48 с.
- Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 550 с.
- Герман М.А.* Спутниковая метеорология. Л.: изд-во ЛГМИ. 1971. 125 с.
- Герман М.А.* Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
- Глазнев В.Н., Запругаев В.И., Усков В.Н.* и др. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2000. 200 с.
- Говердовский В.Ф.* Космическая метеорология с основами астрономии. СПб: изд-во РГТМИ, 1995. 216 с.
- Гущина Д.Ю.* Синоптическая метеорология. Атмосферные фронты. Учебное пособие. М.: изд-во МГУ, 2013. 103 с.
- Дашко Н.А.* Курс лекций по синоптической метеорологии. Владивосток: изд-во ДВГУ, 2005. Электронный ресурс. URL: <https://sites.google.com/site/dashkonina/Home/Introduction> (дата обращения 12.10.2022).
- Динамика кучевых облаков* / Под ред. Ч.Э. Андерсона; пер. с англ. под ред. Н.И. Вульфсона. М.: Мир, 1964. 292 с.
- Зверев А. С.* Синоптическая метеорология. М.: Книга по требованию, 2012. 711 с.
- Зубян Г.Д.* Возникновение и развитие циклонов и антициклонов / Серия Библиотека синоптика. Л.: Гидрометеиздат, 1949. 52 с.
- Курганский М.В.* Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. СПб: Гидрометеиздат, 1993. 168 с.

- Матвеев Л.Т. О причинах образования облаков // Метеорология и гидрология. 1978. № 8. С. 25—31.
- Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 752 с.
- Матвеев Л.Т. Формирование фронтов в атмосфере Земли // Известия РАН. Серия географическая. 2006. № 6. С. 43—47.
- Матвеев Л.Т. Динамика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 311 с.
- Минина Л.С. Практика нефанализа. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 336 с.
- Минакова Н.Е. Комплексное использование данных ИСЗ и МРЛ в анализе атмосферных фронтов. Методическое письмо. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 16 с.
- Милович А.Я. Нерабочий изгиб потока жидкости // Бюллетень Политехнического общества при Императорском Техническом училище. 1914. № 10. С. 485—563.
- Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 615 с.
- Петерсен С. Анализ и прогноз погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 652 с.
- Погосян Х.П. Очерки по истории развития синоптической метеорологии в СССР // Труды ГМЦ. 1989. Вып. 307. 156 с.
- Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: изд-во НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 576 с.
- Рыбакова Ж.В. Облака и их трансформация. Томск: Изд. дом Томского государственного университета, 2020. 234 с.
- Рыбакова Ж.В. Атмосферные процессы в облачных полях. Томск: изд-во Томского государственного университета, 2021. 170 с.
- Рупперт Л.Л. Физические причины изменения давления // Метеорологические прогнозы. 1983. Вып. 82. С. 65—70.
- Стирин А. А. Особенности циклогенеза по типу Шапиро — Кейзера. Выпускная квалификационная работа. СПб: изд-во РГГМУ, 2001. 67 с.
- Степанов В.В. Научные открытия, изобретения и технологии в гидрометеорологии и смежных областях (+CD-ROM). СПб: Наука, 2006. 320 с.
- Степанов В.В. Очерки спутниковой синоптической метеорологии. СПб.: изд-во ЛЕМА, 2011. 192 с.
- Степанов В.В. Стенд для имитационного моделирования атмосферного циклона. Патент № 2773548 // Бюллетень. 2022. №10.
- Степанов В.В. Теоретические основы практического использования спутниковой синоптической метеорологии. СПб: изд-во ЛЕМА, 2011. 272 с.
- Степанов В.В. Материалы к адвективной теории среднеширотных и полярных (арктических) циклонов // Метеорологический вестник. 2017. Т. 9, № 5. С. 55—74.
- Таборовский Н.Л. Гидродинамическая теория бароклинной атмосферы и основные вопросы синоптической метеорологии // Труды НИУ ГУГМС при СМ СССР. Серия II. Синоптическая метеорология. 1947. Вып. 28. С. 3—15.
- Тверской П.Н. Курс метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 700 с.

Толмачева Н.И. Космические методы исследований в метеорологии. Интерпретация спутниковых изображений. Пермь: изд-во Пермского ун-та, 2012. 208 с.

Толмачева Н.И., Тимофеева А.Г. Мезометеорология и мезомасштабные системы атмосферы. Учебное пособие. М.: ИПК Росгидромета, 2017. 200 с.

Хандошко Л.А. Региональные синоптические процессы. Учебное пособие. Л.: изд-во ЛГИ, 1988. 104 с.

Хргиан А.Х. Очерки развития метеорологии. Т. I. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 428 с.

Хргиан А.Х. О формах перистых облаков // Труды ЦАО. 1969. Вып. 39. С. 39—44.

Хргиан А.Х. О строении высококучевых облаков // Труды ЦАО. 1974. Вып. 106. С. 33—51.

Хромов С.П. Метеорология и климатология. М.: Наука, 2006. 582 с.

Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 696 с.

Циклоничность и антициклоничность в системе циркуляции атмосферы. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1974. 127 с.

Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 263 с.

Экба Я.А. Исследование характеристик метеорологических образований (циклонов и антициклонов) / В сб.: Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. Майкоп, 2021. С. 178—186.

Юсупов Ю.И. Использование изэнтропического анализа в оперативном краткосрочном прогнозе погоды // Метеорология и гидрология. 2012. №.1. С.42—49.

Abdullah A.J. Cyclogenesis by a purely mechanical process // J. Meteor. 1949. V. 6. P. 86—97.

Anderson, R.K. et al. Applications of meteorological satellite data in analysis and forecasting. ESSA Tech. Rep. NES-51, Washington, DC. 1972. (NTIS AD-740-017).

Bjerknes J, Solberg H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation // Geofys. Publ. 1922. V. 3. P. 1—18.

Bjerknes, J. On the Structure of Moving Cyclones // Mon. Wea. Rev. V. 47. No. 2. P. 95—99.

Bosart L. F. Observed cyclone life cycles. The Life Cycles of Extratropical Cyclones / M. A. Shapiro and S. Grønås eds. // Amer. Met. Soc. 1999. P. 187—213.

Browning, K.A. Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones. Extratropical Cyclones/ 60th Erik Palmén Memorial Volume / C. W. Newton and E. O. Holopainen eds. // Amer. Met. Soc. 1990. P. 129—153.

Browning K.A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development // Meteorol. Appl. 1997. 4 (3). P. 317—324.

Browning K.A., Monk G.A. A simple model for the synoptic analysis of cold fronts // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1982.V. 108 (456). P. 435—452.

Browning K A, Harrold T.W. The polar low as a baroclinic disturbance // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1969. V. 95. P. 710—723.

Browning K. A., Roberts N.M. Structure of a frontal cyclone// Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1990. V. 120. P. 1535—1557.

- Browning K.A., Pardoe C.W.* Structure of low-level jet streams ahead of mid-latitude cold fronts // Quart. J. R. Met. Soc. 1973. V. 99. P. 619—638.
- Browning K.A.* Conceptual models of precipitation systems // Quart. J. R. Met. Soc. 1985. V. 114. P. 293—319.
- Browning K.A., Roberts N.M.* Structure of a frontal cyclone // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1994. V. 20, Is. 520. P. 1535—1557.
- Browning K.A., Roberts N.* Structure of a frontal cyclone // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1994. V. 120. P. 1535—1557.
- Browning K.A.* Conceptual Models of Precipitation Systems // Weather and Forecasting. 1986. V. 1, No. 1. P. 23—41.
- Browning K.A., Golding B.W.* Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1995. V. 121 (523). P. 463—493.
- Browning K.* Atmospheric rivers in the UK // Bull. Amer. Met. Soc. 2018. V.99 (6). P. 1108—1109.
- Carlson T.N.* Airflow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern // Mon. Wea. Rev. 1980. V. 108. P. 1498—1509.
- Carlson T.N.* Mid-latitude weather systems. London: Harper Collins Academic. 1991. 507 p.
- Evans M.S., Keyser D., Bosart L.F., Lackmann G.M.* A satellite-derived classification scheme for rapid maritime cyclogenesis // Mon. Wea. Rev. 1994. V. 122. P. 1381—1416.
- James P.K., Browning K.A.* Mesoscale structure of line convection at surface cold fronts // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1979. V. 105 (444). P. 371—382.
- Hoskins B.J.* : Dynamical processes in the atmosphere and the use of models // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1983. V. 109. P. 1—21.
- Mass C.* Synoptic frontal analysis: Time for a reassessment? // Bull. Amer. Met. Soc. 1991. V. 72. P. 348—363.
- Miller R.C., McGinley J. A.* Using satellite imagery to detect and track comma clouds and the application of the zone technique in forecasting severe storms. 1978. P.96.
- Reed R.J.* Cyclogenesis in polar air streams // Mon. Wea. Rev. 1979. V.107. P. 38—52.
- Schemm S., Wernli H.* The Linkage between the Warm and the Cold Conveyor Belts in an Idealized Extratropical Cyclone // J. Atm. Sci. V. 1. 71 (4). P. 1443—1459.
- Schultz D.M.* A Review of Cold Fronts with Prefrontal Troughs and Wind Shifts // Mon. Wea. Rev. 2005. V. 133. P. 2449—2472.
- Schultz D.M., Keyser D., Bosart L.F.* The effect of large-scale flow on low-level frontal structure and evolution in midlatitude cyclones // Mon. Wea. Rev. 1998. V. 126. P. 1767—1791.
- Schultz D.M., Browning K.A.* What is a sting jet? // Weather. 2017. V. 72. P. 63—66.
- Schultz D.M., Mass C.F.* The occlusion process in a midlatitude cyclone over land // Mon. Wea. Rev. V. 121. P. 918—940.
- Schultz D.M., Keyser D.* Antecedents for the Shapiro – Keyser Cyclone Model in the Bergen School Literature // Электронный ресурс. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Antecedents-for-the-Shapiro%E2%80%93Keyser-Cyclone-Model-in-Schultz-Keyser/523ced11a60a0f186099e97eb5d2078ced8cc87e/> (дата обращения 12.10.2022).

Semple A.T. Conceptual models of cyclogenesis // Joint Centre for Mesoscale Meteorology (JCMM) Internal Report. 1998. No. 92. P. 37.

Shapiro M. A., Keyser D. Fronts, jet streams, and the tropopause. Extratropical Cyclones. The Erik Palmen Memorial Volume / C.W. Newton and E. Holopainen, eds. // Amer. Met. Soc. 1990. P. 167—191.

Shapiro M.A., Grell D.E. In search of synoptic/dynamic conceptualizations of the life cycles of fronts, jet streams, and the tropopause. V. I / Proc. Int. Symp. on the Life Cycles of Extratropical Cyclones. Bergen, Norway, Geophysical Institute, University of Bergen. 1994. P. 163—181.

Shapiro M.A., Grønås S. The Life Cycles of Extratropical Cyclones // Amer. Met. Soc. 1999. 359 p.

B

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Методология научного подхода в спутниковой синоптической метеорологии	5
1.1. История развития синоптической метеорологии	14
1.2. Парадигма жизненного цикла атмосферного циклона	16
1.3. Теоретическое обобщение эмпирической информации о состоянии атмосферы	18
1.3.1. Понятие предметной области	18
1.3.2. Континуум предметной области	21
1.3.3. Понятие пространственно-временного континуума	22
1.3.4. Свойства пространственно-временного континуума	23
1.4. Наблюдение облачных систем из космоса	31
1.4.1. Наблюдение облаков из космоса	31
1.4.2. Влияние материков и океанов на облачные поля	35
1.4.3. Модели некоторых облачных образований	42
1.5. Выводы	49
Глава 2. Норвежская модель жизненного цикла внетропических циклонов (волновая теория)	50
2.1. Общие сведения	50
2.1.1. Роль воздушных масс и фронтов в формировании полярных атмосферных циклонов	51
2.1.2. Структура холодного фронта	56
2.1.3. Предфронтальные эффекты	58
2.1.4. Структура теплого фронта	61
2.2. Динамика развития атмосферного циклона	67
2.2.1. Стадия волны на полярном фронте	68
2.2.2. Стадия молодого циклона	69
2.2.3. Стадия развитого циклона	71
2.2.4. Стадия окклюдирования циклона	76
Глава 3. Незавершенные концептуальные модели жизненного цикла внетропических фронтальных циклонов	81
3.1. Изэнтропический анализ	81

3.2. Модели, связанные с нефронтальной структурой атмосферного циклона	82
3.2.1. Модель внутритропического циклона Карлсона.....	82
3.2.2. Модель морского внутритропического циклона Браунинга	85
Глава 4. Модель Шапиро — Кейзера жизненного цикла внетропических циклонов	91
4.1. Общие сведения	91
4.2. Структура жизненного цикла модели Шапиро — Кейзера	93
4.2.1. Первая стадия развития циклона по модели Шапиро — Кейзера (стадия волны)	94
4.2.2. Вторая стадия развития циклона по модели Шапиро — Кейзера (фронтальный перелом)	95
4.2.3. Третий этап развития циклона по модели Шапиро — Кейзера	97
4.2.4. Четвертая стадия — заполнение и изоляции теплого ядра циклона по модели Шапиро — Кейзера	99
4.3. Роль несущих потоков в формировании облачной спирали в жизненном цикле модели Шапиро — Кейзера	100
Глава 5. Концепция атмосферного циркуляционного диполя.....	104
5.1. История изучения	104
5.2. Районы образования циркуляционных диполей	109
5.2.1. Первый этап жизненного цикла циркуляционного диполя	110
5.2.2. Второй этап жизненного цикла циркуляционного диполя	114
5.2.3. Третий этап жизненного цикла циркуляционного диполя	115
5.2.4. Четвертый этап жизненного цикла циркуляционного диполя	116
5.3. Экспериментальная проверка отдельных механизмов формирования циркуляционного диполя	116
Глава 6. Арктические циклоны	120
6.1. Определение	120
6.2. Проблема наблюдения	122
6.3. Механизмы формирования арктических циклонов	125
6.4. Перспективы изучения мезоциклонов	128
Заключение	129
Список литературы	130

Подписано в печать 10.11.2022
 Формат 60×90 1/16
 Тираж 300

Печать цифровая
 Печ. л. 8,5
 Заказ №

Отпечатано ИП Келлер Т.Ю.
 194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Менделеевская, 9.