

## Динамическая метеорология

Власовец И.

Белорусский национальный технический университет

### *Введение*

Динамическая метеорология является одной из метеорологических дисциплин, которая изучает атмосферные процессы на основе общих законов физики (гидромеханики и термодинамики).

Движение воздуха возникает под влиянием неравномерного распределения давления. Неравномерность же распределения давления обусловлена процессами теплообмена в атмосфере и на ее границе с землей. Возникающие при этом атмосферные движения оказывают обратное влияние на процессы тепло- и влагообмена. Таким образом, атмосферные движения в совокупности с тепло- и влагообменом представляют собой основные факторы, определяющие погоду и климат.

Динамическая метеорология, изучая атмосферные движения во взаимосвязи с термодинамическими процессами, вскрывает основные закономерности погоды и климата, а затем использует эти закономерности для решения различных практических задач, важнейшими среди которых являются разработка объективных методов прогноза погоды и развитие теории воздействий на погоду и климат.

Основным методом исследования в динамической метеорологии является преобразование и решение общих уравнений гидротермодинамики применительно к физическим условиям в атмосфере.

Исходные уравнения динамической метеорологии представляют собой выражение основных законов физики: закона сохранения импульса движения (второго закона

Ньютона), закона сохранения энергии, закона сохранения массы.

Особенности атмосферных процессов, в соответствии с которыми осуществляется преобразование общих уравнений гидротермодинамики применительно к решению метеорологических задач, познаются путем обобщения фактических данных, полученных из наблюдений, а также на основании специальных экспериментальных исследований. При этом теоретические выводы проверяются путем сопоставления их с фактическими данными наблюдений и только после опытной проверки выводы теории используются для решения практических задач.

Таким образом, метеорологическая практика служит как источником, так и критерием правильности теории, которая указывает наиболее важные направления дальнейших экспериментальных исследований. Отсюда следует, что развитие динамической метеорологии тесно связано с синоптической метеорологией, климатологией, аэрологией и экспериментальной метеорологией.

Предлагаемое учебное пособие написано с целью первоначального ознакомления студентов-метеорологов с основами количественного анализа атмосферных процессов, исходя из законов гидротермодинамики.

## ***1. Задачи динамической метеорологии***

Главная задача динамической метеорологии — прогноз погоды, именно разработка численных методов прогноза метеорологических элементов (давления, температуры, ветра, облачности, осадков, видимости) на различные сроки на основе изучения общей циркуляции атмосферы), т. е. системы крупномасштабных переносов воздуха над нашей планетой. Динамическая метеорология занимается и более ограниченными задачами — анализом происхождения и поведения атмосферных волн и вихрей различного масштаба и деталей общей циркуляции (фронтов атмосферных и струйных течений), а также атмосферной турбулентности и конвекции. [5]

Попытки теоретического объяснения отдельных особенностей атмосферной циркуляции восходят к 1-й половине 18

в. (английский учёный Дж. Хэдли). В начале 19 в. П. Лапласом была теоретически установлена связь между изменением атмосферного давления с высотой и температурой (Барометрическая формула) и тем заложены основы статики атмосферы. В 1-й половине 19 в. возникла термодинамика, которая вскоре была применена к объяснению отдельных атмосферных процессов (таких, как Фён). Однако только в 80-х гг. в работах немецких учёных Г. Герца, В. Бецоляда и др. оформилась теория адиабатических процессов (т. е. процессов, в которых можно пренебречь теплообменом) в атмосфере, содержащей водяной пар; дальнейшее её развитие относится уже к 20 в. (английский учёный У. Н. Шоу, норвежские учёные А. Рефсдаль, Я. Бьеркнес и др.). В 1-й половине 19 в. французский учёный Г. Кориолис предложил теорему об относительном движении на вращающейся Земле, что позволило применить уравнения гидродинамики, сформулированные Л. Эйлером ещё в 18 в., к метеорологическим проблемам. У. Феррель (США) в ряде исследований, начатых в 1856, дал первую теоретическую модель общей циркуляции атмосферы, основанную на уравнениях гидромеханики, что способствовало оформлению динамической метеорологии как научной дисциплины. В 80-х гг. 19 в. крупный вклад в развитие динамической метеорологии внёс Г. Гельмгольц, предложивший теоретическую модель общей циркуляции поверхности разрыва (атмосферные фронты). В 1897 В. Бьеркнес теоремами о циркуляции и вихреобразовании положил начало «физической гидродинамике» атмосферы как сжимаемой жидкости наиболее общего типа (бароклинной жидкости), в которой распределение плотности зависит от распределения как давления, так и температуры. В 1904 он сформулировал задачу прогноза погоды как решение уравнений атмосферной термогидродинамики. Развитие идей В. Бьеркнеса определило дальнейшие успехи Д. м. В начале 20 в. М. Маргулес в Австрии, В. Бьеркнес и др. построили теорию атмосферных фронтов; Маргулес также заложил основы энергетики атмосферы. В это же время интенсивно изучалась атмосферная турбулентность, определяющая вертикальный обмен тепла, влаги, коллоидных примесей и количества движения в атмосфере. [1]

В 20-х гг. 20 в. начинается быстрое развитие динамической метеорологии в СССР; сформировалась советская школа динамической метеорологии, основанная А. А. Фридманом.

Ещё в 1914 Фридман совместно с шведским учёным Т. Гессельбергом впервые дал оценки порядков величин основных метеорологических элементов (давления, температуры, влажности и др.) и их изменчивости, позволившие упростить уравнения динамической метеорологии. В 1922 Фридман построил и детально проанализировал общее уравнение для определения вихря скорости, характеристики местного вращения среды около мгновенных осей в движущейся жидкости, которое впоследствии приобрело фундаментальное значение в теории прогноза погоды. Н. Е. Кочин в 1931 решил задачу о потере устойчивости поверхности раздела между двумя воздушными массами (См. Воздушные массы), связанной с образованием циклонов, а в 1935 развил теорию общей циркуляции атмосферы, используя идею о планетарном пограничном слое. А. А. Дородницын (1938, 1940) теоретически решил задачу о влиянии горного хребта на воздушный поток, в 1940 он рассчитал суточный ход температуры. Принципиальным шагом в решении основной практической задачи динамической метеорологии — прогноза погоды — явилась работа И. А. Кибеля, в которой был дан метод прогноза поля давления и температуры на сутки (1940). Основы гидродинамического метода долгосрочных прогнозов были заложены в работе Е. М. Блиновой (1943). Один из узловых вопросов Д. м. — взаимосвязь полей давления и ветра в атмосфере — был исследован шведским учёным К. Г. Росби (1938) и успешно решён А. М. Обуковым в СССР в 1949. В дальнейшем эта задача была обобщена в работах 1950-х гг. И. А. Кибеля и А. С. Мониной, что позволило в 1960-х гг. перейти к более точным методам прогноза погоды. Первые численные прогнозы давления были выполнены в 1951 американским учёным Дж. Чарни и др. Существенным шагом в теории прогноза явились работы Г. И. Марчука и Н. И. Булеева (1953; СССР) и К. Хинкельмана (ФРГ), в которых впервые учитывалось влияние процессов на большой площади на изменение атмосферных условий в пункте, для которого рассчитывается прогноз. Появление в 50-х гг. ЭВМ и бурное развитие вычислительной математики дали толчок интенсивному развитию многих разделов Д. м.

Основные уравнения динамической метеорологии рассматривает тонкий по сравнению со средним радиусом Земли (6374 км) слой атмосферы толщиной в 20—30 км. Здесь сосредоточено почти 98% всей её массы, что обусловлено влиянием

силы тяжести — одной из основных сил, действующих на малый объём («частицу») воздуха. Атмосфера Земли в этом слое — достаточно плотная среда, чтобы рассматривать её как непрерывную и применять к ней законы механики сплошных сред: закон сохранения массы, позволяющий написать уравнение неразрывности, и закон изменения количества движения (См. Количество движения). Главные силы, действующие на частицу воздуха (помимо силы тяжести), — отклоняющаяся сила вращения Земли (или Кориолиса сила) и диссипативные силы турбулентного трения. Основными особенностями движений, рассматриваемых в динамической метеорологии, являются малость скорости ветра по отношению к скорости звука и большое влияние силы тяжести.

Динамика атмосферных процессов всевозможных масштабов тесно связана с притоком тепла. Применение первого начала термодинамики к атмосферным процессам даёт так называемое уравнение притока тепла под действием трёх основных источников тепла в атмосфере: лучистого и турбулентного притоков тепла, а также выделения энергии при фазовых переходах влаги из одних состояний в другие (пар, жидкие капли, лёд). Термодинамические параметры атмосферы — давление, температура и плотность — связаны уравнением состояния (См. Уравнение состояния).

К перечисленным уравнениям добавляются уравнения, определяющие перенос лучистой энергии в атмосфере, перенос влаги, условия образования облаков и выпадения осадков. Граничные условия на земной поверхности связывают температуру воздуха с температурой поверхности материков и океанов. Взаимно обусловленными оказываются также воздушные и океанические течения. Т. о., общая постановка задачи динамической метеорологии включает определение давления, плотности, температуры и влажности воздуха, трёх составляющих ветра, условий образования облаков и осадков в связи с величинами, характеризующими состояние океана и суши. Эта задача чрезвычайно сложна и решается лишь при весьма существенных упрощениях. Развитие Д. м. тесно связано с разработкой методов решения нелинейных уравнений математической физики. [6]

## ***2. Основные проблемы динамической метеорологии***

1) Изучение общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Интегрирование уравнений динамической метеорологии на длительные сроки при возможно полном учёте тепло- и влагообмена в атмосфере, а также термического и динамического взаимодействия океана и атмосферы позволило создать математическую модель ОЦА, которая в главных чертах соответствует данным наблюдений. Изменяя внешние параметры, можно выяснить причины аномалий климата, а также установить закономерности климата прошлых геологических эпох. Эти работы имеют значение и для теории долгосрочного прогноза погоды. Имеющиеся эмпирические сведения об атмосфере Земли ещё не вполне достаточны для построения полной модели ОЦА. В связи с этим важной задачей Д. м. является исследование глобальных атмосферных процессов путём изучения процессов переноса радиации конвекции и др.

2) Исследование турбулентности в атмосфере и гидросфере. Роль турбулентного обмена в атмосфере весьма велика; за редким исключением все атмосферные движения по существу являются турбулентными. Для развития и совершенствования теории турбулентности необходимо наряду с разработкой математических моделей развивать тонкие экспериментальные методы определения локальных и интегральных характеристик турбулентного обмена. [4]

3) Прогноз погоды. Условно проблема делится на три части: краткосрочный прогноз на срок до 3 суток, долгосрочный прогноз (прогноз на 5—10 дней, прогноз на месяц и даже на сезон) и прогноз местных условий погоды. Начиная с 60-х гг. 20 в. прогнозы синоптического положения (преимущественно распределения давления и др. метеорологических элементов над обширным районом) на короткий срок методами Д. м. широко применяются в ряде стран с высокоразвитой вычислительной техникой (СССР, США, Великобритания, Франция, Швеция, Норвегия и др.). В опытным порядке составляются также долгосрочные прогнозы отдельных элементов (средняя температура и давление) на основе Д. м. Методы этих прогнозов более тесно связаны с моделями ОЦА, чем методы краткосрочного прогноза. Прогноз местных условий погоды составляет пока

преимущественно эмпирическим путём на основе прогноза общего синоптического положения. Теоретические подходы к такому прогнозу трудоёмки и сложны; на базе Д. м. такие прогнозы составляются лишь в опытном порядке в наиболее хорошо оснащённых вычислительной техникой прогностических центрах. Широкое использование сверхбыстродействующих ЭВМ позволит разрабатывать прогностические схемы, в которых одновременно с долгоживущими особенностями метеорологического режима будут получать и короткоживущие, определяющие изменение условий погоды над небольшой территорией.

### *Литература*

1. Основы динамической метеорологии, Л., 1955; Белинский В. А., Динамическая метеорология, М. — Л., 1948;
2. Марчук Г. И., Численные методы в прогнозе погоды, Л., 1967;
3. Юдин М. И., Новые методы и проблемы краткосрочного прогноза погоды, Л., 1963;
4. Монин А. С., Прогноз погоды как задача физики, М., 1969;
5. Кибель И. А., Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды, М., 1957;
6. Метеорология и гидрология за 50 лет Советской власти, под ред. Е. К. Федорова, Л., 1967.