ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

В. А. Рожков

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

ЧАСТЬ 3

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СОСТОЯНИЯ И ДВИЖЕНИЯ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ. КЛИМАТ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В. А. Рожков

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

ЧАСТЬ 3

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СОСТОЯНИЯ И ДВИЖЕНИЯ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ. КЛИМАТ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ББК 26.23
Р63

Р е ц е н з е н т ы: д-р геогр. наук, проф. *Г. В. Алексеев* (Арктич. и антарктич. науч.-исслед. ин-т); канд. геогр. наук *В. В. Ионов* (С.-Петерб. гос. ун-т)

Печатается по решению
Редакционно-издательского совета
факультета географии и геоэкологии
С.-Петербургского государственного университета

Рожков В. А.

Р63 Статистическая гидрометеорология. Часть 3. Неустойчивость состояния и движения. Взаимодействие океана и атмосферы. Климат. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2015. — 255 с.

ISBN 978-5-288-05427-3
ISBN 978-5-288-05605-5 (Ч. 3)

Проанализированы источники стохастичности гидрометеорологических полей за счет возмущений их состояния и устойчивости, необходимость использования для описания перехода из одного состояния в другое понятий из области синергетики и фрактальной геометрии. Рассмотрены вопросы взаимодействия атмосферы и океана как реакция этой термодинамической системы на стохастические потоки тепла, влаги и количества движения между подсистемами. Изложена современная точка зрения на климатическую систему, состоящую из пяти подсистем, в которую входят не только атмосфера и гидросфера, но и биосфера, литосфера и криосфера. Понятие «климат» может быть описано с двух позиций: когда под климатом понимают статистический ансамбль возможных состояний климатической системы, характеризуемый распределением вероятностей на фазовом пространстве; и когда климат — почти интразитивная климатическая система, фазовое пространство которой распадается на ряд множеств A_i с определенными вероятностными мерами $P(A_i)$ и фазовые траектории могут длительное (но конечное) время пребывать в каждом из этих множеств и переходить из одного множества в другое. Математическим образом такого движения, описываемого системой нелинейных дифференциальных уравнений, является аттрактор.

ББК 26.23

ISBN 978-5-288-05427-3
ISBN 978-5-288-05605-5 (Ч. 3)

4. НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЙ И ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ

При обсуждении влияния стохастических или детерминированных возмущений на структуру воздушной и водной среды используют такие понятия, как устойчивость или неустойчивость состояния и движения, нелинейность реакции динамических систем на возмущение, диссипативные структуры, странные аттракторы, фрактальная геометрия, синергетика и др. Эти понятия необходимы для понимания физической природы тонкой структуры морских вод, динамики фронтальных зон в атмосфере и океане, особо опасных гидрометеорологических явлений, например смерчей, торнадо и др.

4.1. Нелинейные динамические системы

Хаотические колебания (ХК) — сложный режим, который возникает при определенных условиях в нелинейных системах различной природы и не связан с действием на эти системы случайных шумов. ХК — это возникновение неупорядоченных движений в совершенно детерминированных системах.

Случайное движение относят к ситуации, когда мы не знаем действующих сил или знаем только некоторые статистические характеристики параметров. Хаотическое движение — это движение, где отсутствуют случайные или непредсказуемые силы или параметры.

Термин «хаотический» применяют к движениям в детерминированных физических и математических системах, траектории которых обнаруживают сильную зависимость от начальных условий.

ХК возникают в присутствии сильной нелинейности, например нелинейное затухание типа трения; силы, создаваемые жидкостями; нелинейные граничные условия; силы, создаваемые нелинейными обратными связями в системах управления.

В непрерывных механических средах нелинейные эффекты могут возникать по следующим причинам:

• кинематика (переносное ускорение, кориолисово и центробежное ускорения);

• зависимость напряжений от деформаций;

• граничные условия (свободная поверхность жидкости);

• нелинейные массовые силы.

Эти нелинейности входят в уравнение сохранения импульса сплошной среды

$$\nabla T + f = \frac{\partial V}{\partial t} + V\nabla V,$$

где T — тензор напряжений; f — массовая сила; $V\nabla V$ — переносное ускорение.

Колебания. В физике (или теоретической механике) под колебаниями понимают изменения состояния системы, происходящие более или менее регулярно во времени. Положение или состояние какой-либо колеблющейся системы определяется обобщенной координатой, характерной для каждой системы. Основным отличительным признаком колебательной системы является число степеней свободы, равное числу координат, необходимых для однозначного описания движения системы. Другой отличительный признак — вид дифференциальных уравнений движения системы, третий — форма колебаний. По характеру возмущения, действующего на колебательную систему, различают следующие типы колебаний:

Собственные (свободные) колебания, когда после кратковременного возмущения система не подвергается какому-либо внешнему воздействию, т. е. во время движения не подводится энергия извне (например, движение гравитационного маятника после кратковременного толчка, переход ветрового волнения в зыбь, сейши). Эти колебания описываются однородными дифференциальными уравнениями.

Автоколебания (самовозбуждающиеся) наблюдаются, когда имеется приток энергии в систему (например, часы, ход которых зависит от поднятого груза или закрученной пружины; годовой ход температуры воздуха, см. главу 1). Эти колебания описываются нелинейными дифференциальными уравнениями.

Параметрические колебания возбуждаются под внешним воздействием и отражаются в периодических изменениях одного или нескольких параметров (например, приливной потенциал и колебания уровня, скорости течений и внутренние волны, см. главу 3).

В дифференциальных уравнениях коэффициенты явно зависят от времени.

При *вынужденных колебаниях* система подвергается внешним воздействиям, которые и определяют период колебаний (например, воздействие ветра на волны, см. главу 3). В уравнениях движения появляются новые члены, дифференциальные уравнения неоднородные, причем правая часть этих уравнений зависит от времени.

Связанные колебания возникают, когда две (или более) колебательные системы оказывают друг на друга взаимное влияние (например, взаимодействие океана и атмосферы, см. главу 5; или подсистем климатической системы, см. главу 6).

При собственных и автоколебаниях частота определяется самим осциллятором (поэтому их называют автономными), в параметрических и вынужденных колебаниях частота задается внешними воздействиями (их называют гетерономными).

Пример. Гравитационный маятник. Рассмотрим уравнение движения материальной точки, подвешенной на нитке и движущейся в плоскости. При отклонениях маятника (массой m) на угол φ от вертикали возникает составляющая силы тяжести $K_g = -mg\sin\varphi$. Дуга, описываемая материальной точкой, имеет длину $L\varphi$, ускорение точки равно $L\ddot{\varphi}$, а сила инерции $K_t = -mL\ddot{\varphi}$. Полагая $\omega^2 = g/L$, получаем нелинейное уравнение движения

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \sin\varphi = 0. \tag{1}$$

При малых углах φ уравнение (1) можно линеаризовать:

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = 0. \tag{2}$$

Обозначая φ через x, запишем общее решение (2) в виде

$$x = A\cos\omega t + B\sin\omega t. \tag{3}$$

В каждом реальном осцилляторе действует сила, оказывающая демпфирующее воздействие на колебания маятника (обычно она прямо пропорциональна скорости). Тогда вместо (2) будет

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2D\frac{dx}{dt} + x = 0, \tag{4}$$

где D — безразмерный коэффициент демпфирования, а вместо (3)

$$x = C\exp(-D\tau)\cos(\omega\tau - \varphi). \tag{5}$$

Из (5) следует, что амплитуда колебаний экспоненциально затухает. При вынужденных колебаниях в уравнение движения системы входит зависящий от времени член, который не зависит от координаты, характеризующей положение системы. Тогда вместо (4) имеем

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2D\frac{dx}{dt} + x = x_0\cos\eta\tau, \tag{6}$$

где $\eta = \Omega/\omega_0$ — отношение частоты возмущения к собственной частоте недемпфированной системы.

Решение уравнения (6)

$$x = x_0 U \cos(\eta\tau - \psi). \tag{7}$$

Физически (7) означает, что гармоническое колебание происходит с амплитудой $x_0 U$ и отстает по фазе от возмущающего воздействия на угол ψ. Величину U называют коэффициентом усиления (или динамичности).

Если на нелинейную систему действует периодическая сила, то при постоянной амплитуде вынуждающей силы существует диапазон вынуждающих частот, в котором возможны три вида амплитуды отклика: при увеличении и уменьшении частоты происходит гистерезис (это явление называют перебросом); кроме того, среди решений есть субгармонические и супергармонические колебания.

Эволюционный процесс математически описывается векторным полем в фазовом пространстве. Точка этого пространства задает состояние системы. Кривые в фазовом пространстве, образованные последовательными состояниями процесса, называют фазовыми кривыми. Установившиеся режимы движения получили название аттракторов, так как они «притягивают» соседние режимы (*от англ.* attract — притягивать). Аттракторы, отличные от состояний равновесия и строго периодических колебаний, получили название странных аттракторов.

Классической физической интерпретацией аттрактора динамической системы является понятие автоколебательного режима.

Основной вопрос статистической механики, откуда в системе берется хаос, позволяющий применить для его описания вероятностные методы, за последние десятилетия нашел ответ (один из возможных) в условиях неустойчивости нелинейных динамических систем. Г. М. Заславский (1984) обосновал суть явления, которое называют стохастичностью, тем, что динамическая система может испытывать особого рода неустойчивость. Она является внутренним (нелинейным) свойством системы и не связана с действием каких-либо априори случайных сил. Термин «хаос» приобрел смысл аббревиатуры (хаотические автоколебания организованных систем).

Изменение во времени системы с $N/2$ степенями свободы описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (динамической системой)

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1,\ ...,\ x_N,\ \mu_1,\ ...,\ \mu_k), \tag{8}$$

где x — фазовые координаты; μ — параметры системы; $f(x,\ \mu)$ — нелинейные функции фазовых координат, зависящие от параметров.

Эволюции системы во времени можно однозначно поставить в соответствие фазовую траекторию в N-мерном пространстве, координатами которого служат фазовые переменные.

В. С. Анищенко (1990) рассматривает хаотические колебания, не являющиеся периодическими или квазипериодическими. Отличительная особенность как странных, так и квазигиперболических аттракторов в фазовом пространстве систем — экспоненциальная неустойчивость фазовых траекторий и их дробная размерность (фрактальность).

Фракталы — это множества дробной размерности (нечто промежуточное между точками и линиями, линиями и поверхностями, поверхностями и телами). Именно такие образования определяют структуру аттракторов динамических систем, ответственных за возникновение хаотического, плохо предсказуемого поведения в системах, управляемых детерминированными законами. К таким системам относят нелинейные системы гидродинамического типа, в которых возникает гидродинамическая неустойчивость движения, существует турбулентность, плохая прогнозируемость погоды. Кроме того, они необходимы для описания бифуркаций аттракторов, т. е. перестройки качественного поведения устанавливающегося в системе режима при плавном изменении параметров, от которых система зависит.

Наиболее очевидна необходимость фрактальной геометрии при описании очертаний (и вычислении длин L) сложной береговой линии (фьердового типа). В качестве примера на рис. 1 представлено побережье Норвегии. Для вычисления длины этого побережья выбрана сетка с шагом 50 км. Но если его уменьшить до 20, 10, 1 км и менее, то длина изменится. Б. Б. Мандельброт назвал фракталом структуру, состоящую из частей, в каком-то смысле подобных целому, и предложил аппроксимацию вида

$$L(\delta) = a\delta^{1-D},$$

где δ — размер ячейки; a — параметр; D — число (фрактальная размерность).

Например, для Норвегии $D \sim 1,52$ или для Великобритании $D \sim 1,3$, для поверхности облаков $D \sim 2,34$; турбулентная структура $2 < D < 3$. Пример выбора шага δ для различных условий представлен на рис. 2, а примеры перехода к геометрическим образам дробной размерности — на рис. 3. Этот подход позволил создавать модели процессов с дробной размерностью.

Херст, занимаясь изучением водных ресурсов Нила, применил нормированный размах R/s и ввел показатель H:

$$(R/s) = (\tau/2)^H,$$

где τ — длина реализации, лет; s — среднеквадратичное отклонение.

После публикаций Херста для того, чтобы отметить многомасштабность структуры временных рядов, используют показатель H, например, сток рек $H = 0{,}72$; уровень осадков $H = 0{,}70$; температура $H = 0{,}68$; атмосферное давление $H = 0{,}63$.

Теория возмущений. Процессы потери устойчивости и начальные стадии роста возмущений описывают в линейном приближении при следующих предположениях:

1. Возмущения малые (инфинитезимальные), все их взаимодействия между собой, а также их влияние на основное течение пренебрежимы, значение имеет только воздействие основного потока на возмущения.

2. Возмущения представляют собой набор гармонических составляющих, их называют элементарными волнами или нормальными модами; они могут иметь как волновую, так и непериодическую по координатам структуру в виде рядов или интегралов Фурье. Линейный анализ включает выделение класса условий, при которых возможен рост возмущений, нахождение показателей роста и других характеристик наиболее неустойчивых волн.

3. Исходная система уравнений включает уравнения движения, неразрывности, притока тепла, уравнение состояния, уравнение для потенциальной температуры, уравнение переноса влаги.

4. Движение представляет собой сумму основного потока, свойства которого задаются, и возмущений бесконечно малой амплитуды:

$$\zeta = (u,\ v,\ w,\ \theta,\ T,\ P,\ q); \quad \zeta = \bar{\zeta} + \zeta', \tag{9}$$

где q — удельное влагосодержание, т. е. суммарная массовая доля пара, жидкой влаги и льда; θ — потенциальная температура.

Основной поток бывает либо невозмущенным (существовавшим до появления возмущений), либо осредненным (на фоне которого существуют флуктуации). Пространственные и временные масштабы изменений основного потока намного больше, чем масштабы изменения возмущений.

В линейном приближении исходная система распадается на две: одна описывает основной поток в отсутствие возмущений, вторая содержит характеристики основного потока (известное решение первой системы) и характеристики возмущений, относительно которых система линейна (системы уравнений более высоких порядков не рассматриваются). Свойства возмущений, зависящие от известных свойств основного потока, определяют из решения второй системы. Обратное влияние возмущений на основной поток не учитывается. Это означает, что когда рост возмущений обусловлен большим сдвигом скорости, то энергия основного потока не убывает, несмотря на то что возмущения потребляют ее, т. е. запасы энергии предполагаются бесконечно большими (по сравнению с затратами на рост возмущений), а возмущения должны быть бесконечно малыми.

Виды неустойчивости

Конвективная неустойчивость. Это неустойчивость слоя воздуха, в котором потенциальная температура неодинакова на разных уровнях, и следовательно, на частицы, сместившиеся относительно уровня покоя, действует сила плавучести. Сила плавучести либо возвращает частицу на исходный уровень (состояние статически конвективно-устойчиво), либо вынуждает ее удаляться (состояние неустойчиво):

$$\zeta' = \zeta(z) \exp\left[i\left(kx + ly + \omega t\right)\right]. \tag{10}$$

На этом примере хорошо видна связь неустойчивости с волновыми движениями. Возмущением является смещение какой-либо частицы воздуха вверх и вниз от уровня, на котором она находится. Плотность сместившейся частицы может быть больше или меньше окружающего воздуха (см. разделы 3.5, 3.7, 4.2).

Гидродинамическая неустойчивость. Реальные движения должны не только удовлетворять уравнениям гидродинамики, но и быть устойчивыми в том смысле, что неизбежно возникающие в реальных условиях малые возмущения этих движений должны затухать со временем, не меняя общей картины движения. Если возмущения будут разрастаться со временем, то это приведет к существенному искажению исходного движения. В частности, значение Re_{cr} соответствует потере устойчивости при переходе от ламинарного движения к турбулентному (см. главу 2).

Турбулентность характеризуется наличием весьма сложных колебаний поля скорости и других характеристик течения. Это явление объяснимо, если рассматривать текущую жидкость как динамическую систему с очень большим числом степеней свободы, в которой в результате притока энергии извне возникают автоколебания. По Ландау, число степеней свободы турбулентного потока, занимающего ограниченный объем, пропорционально $(\mathrm{Re}_{cr})^{(9/4)}$.

Неустойчивость Гельмгольца. Один из простейших примеров абсолютно неустойчивого потока жидкости — течение около поверхности тангенциального разрыва скорости. Пусть два слоя идеальной жидкости скользят один по другому с противоположными скоростями U и $-U$, образуя поверхность разрыва скорости. Допустим, что в результате некоторого возмущения на этой поверхности образовалась волна малой амплитуды. Даже если эта волна остается неподвижной, то над гребнями волны линии тока будут сгущаться (т. е. скорость повысится), а в ложбинах линии тока станут реже (скорость понизится). Таким образом, в жидкости возникнут поперечные градиенты давления, которые будут стремиться увеличить амплитуду волны. В дальнейшем это увеличение амплитуды приведет к распаду волны на отдельные вихри, положив начало турбулизованной зоне (см. раздел 3.2).

Неустойчивая стратификация. При наличии стратификации в атмосфере или океане, когда имеется зависимость плотности $\rho = \rho(z)$ и скорости $u = u(z)$ от вертикальной координаты, движение будет абсолютно неустойчиво при $d\rho/dz > 0$, а при $d\rho/dz < 0$ критерием устойчивости является число Ричардсона:

$$Ri = \frac{\dfrac{-g}{\rho}\dfrac{d\rho}{dz}}{\left(\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)^2}. \tag{11}$$

Течение с вертикальным сдвигом скорости может стать неустойчивым по отношению к возмущениям внутренних волн, когда число (11) окажется ниже критического значения, равного $^1/_4$ (см. раздел 3.5).

Условия Орра—Зоммерфельда. При рассмотрении полей скорости U и давления P в виде (9) линейные уравнения гидродинамики для малых возмущений примут вид

$$\begin{gathered}\frac{\partial u'_i}{\partial t} + U_\alpha \frac{\partial u'_i}{\partial x_\alpha} + u'_\alpha \frac{\partial U_i}{\partial x_\alpha} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \nu \Delta u'_i;\\ \frac{\partial u'_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0.\end{gathered} \tag{12}$$

Возможность разложения системы (12) в ряд по базисным функциям (10) существенно зависит от постановки конкретной задачи. Здесь возмущения двумерны:

$$\vec{u}'(x,\ z,\ t) = (u',\ w').$$

Трехмерные возмущения теряют устойчивость при больших значениях Re позже, чем двухмерные. Тогда (12) имеют вид

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + U\frac{\partial u'}{\partial x} + w'\frac{dU}{dz} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p'}{\partial x} + \nu\Delta\, u'; \tag{13}$$

$$\frac{\partial w'}{\partial t} + U\frac{\partial w'}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p'}{\partial z} + \nu\Delta w'; \tag{14}$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0. \tag{15}$$

Используя уравнение неразрывности и переходя к функции тока ψ, получим

$$u' = -\frac{\partial\psi}{\partial z}; \quad w' = \frac{\partial\psi}{\partial x}; \tag{16}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + U\frac{\partial}{\partial x}\right)\Delta\psi - \frac{d^2}{dz^2}\frac{\partial\psi}{\partial x} = \nu\Delta^2\psi. \tag{17}$$

Решая (17) для ψ вида

$$\psi\,(x,\ z,\ t) = \exp\{ik(x - ct)\}\varphi(z), \tag{18}$$

получим уравнение Орра—Зоммерфельда:

$$(U-c)(\varphi''-k^2\varphi)-U''\varphi=-\frac{i\nu}{k}(\varphi^{\mathrm{IV}}-2k^2\varphi''+k^4\varphi). \quad (19)$$

Собственные значения задачи (19) будут комплексными числами $C=c_1+ic_2$, зависящими от волнового числа k и от вязкости ν. Действительная часть c_1 — это скорость распространения волны, а мнимая часть c_2 — изменения амплитуды волны со временем: при $c_2<0$ амплитуда будет затухать, при $c_2>0$ расти со временем. Эта задача рассмотрена в разделе 3.2 как теория Майлза (теория развития волн под влиянием ветра).

Бароклинная неустойчивость. Различают два вида неустойчивости при малых и больших числах Россби Ro. При относительно больших, но конечных значениях Ro сила Кориолиса не подавляет вертикальных перемещений частиц, т. е. гидростатическое равновесие отсутствует. Этот вид бароклинной неустойчивости называют инерционной неустойчивостью. Неустойчивость, возникающая при малых значениях Ro, связана с волнами Россби (см. раздел 4.5).

Синергетика (*от греч.* совместное действие). В результате этого действия происходит самоорганизация отдельных частей какой-либо неупорядоченной системы — возникают пространственные, временные или пространственно-временные детерминированные и стохастические структуры (или процессы) (Николис, Пригожин, 1979, 2003; Хакен, 1980, 1985).

В современной математике идея структуры принадлежит к числу важнейших представлений. Множества M состоят из элементов a. Существование отношения $a\in M$ является первым важным признаком структуры. Математическое понятие структуры неотделимо от понятий «множество», «элемент», «отношение», «операция» и т. д. Структура системы, определенная как совокупность отношений, задает связь между элементами системы.

Классическим примером структуры является пространство возможных состояний системы (см. главу 1). В простейшем случае рассматривается дискретное конечное множество состояний X_i, вероятность состояния X_i есть p_i, $i=1,\,2,\,\ldots,\,W$:

$$\sum_{i=1}^{W} p_i=1.$$

Мерой неопределенности состояния X_i считается величина $-\log_b p_i$. Физический мир — это мир неустойчивостей и флюктуаций. В 1 см^3 газа или жидкости содержится 10^{19} молекул, движущихся во всевозможных направлениях и непрерывно сталкивающихся друг с другом. Это так называемый молекулярный хаос. Однако зимой во время снегопада снежинка имеет характерную дендритовую форму. Это лишь одно из возможных проявлений самоорганизации в виде ритмически изменяющихся во времени пространственных картин.

Тепловая конвекция лежит в основе таких явлений, как циркуляция атмосферы и океанов (см. главу 2), дрейф континентов под действием крупномасштабных движений мантии (см. главу 6). На Солнце тепловая конвекция лежит в основе переноса тепла и вещества, определяющего солнечную активность (см. раздел 1.2). Следовательно, огромное число частиц обладает когерентным (сложным) поведением, несмотря на случайное тепловое движение каждой из частиц.

Неравновесный фазовый переход, диссипативные структуры. В физике известно много примеров образования более упорядоченных состояний в ходе неравновесных процессов. При этом упорядочение может происходить как во времени, так и в пространстве (предельные циклы в автоколебательных системах, ячейки Бенара при конвективном движении в жидкостях). И. Р. Пригожин назвал такие упорядоченные образования диссипативными структурами, подчеркнув в названии, что эти структуры возникают в диссипативных системах в ходе неравновесных (необратимых) процессов.

Диссипативная структура характеризуется нарушением симметрии, множественными выборами и корреляциями в макроскопических масштабах. Одна из особенностей сложного поведения — это способность осуществлять переходы между отдельными режимами; фазовые переходы меняют пространственную структуру. Ю. Л. Климонтович (1982) рассматривает переход от ламинарного течения к турбулентному как переход к чрезвычайно сложному, но более упорядоченному движению или, точнее, как неравновесный фазовый переход к самоорганизующейся системе. Большая упорядоченность турбулентного течения проявляется в замене молекулярной передачи импульса от слоя к слою соответствующим кооперативным упорядоченным процессом — возникает турбулентная вязкость.

При переходе к турбулентности структура течения существенно усложняется, флуктуации — отклонения от осредненного движения — увеличиваются, резко возрастают эффективные вязкость и теплопроводность. Это показывает, что среда при турбулентном движении обладает гораздо большей способностью к внутреннему переносу количества движения и энергии. Итак, основная задача теории турбулентности — это выявление «структуры хаоса».

Диссипативные системы (ДС). Эти системы приводят к необратимым процессам, простейшим примером ДС служат системы с трением. Механика жидких сред оказалась областью, где диссипативные процессы (ДП) играют решающую роль. При макроскопическом описании систем используют такие коллективные переменные, как температура T, концентрация c, давление, конвективная скорость. Уравнения, управляющие поведением этих переменных, неинвариантны относительно обращения времени; примерами ДП являются теплопроводность и диффузия, описываемые уравнениями Фурье и Фика:

СОДЕРЖАНИЕ

Научное издание

Валентин Алексеевич Рожков

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Часть 3

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СОСТОЯНИЯ И ДВИЖЕНИЯ.
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ. КЛИМАТ

Редактор *О. В. Махрова*

Компьютерная верстка *Е. М. Воронкова*

Подписано в печать 18.11.2015. Формат $70\times100\ ^{1}/_{16}$.
Усл. печ. л. 20,8. Тираж 117 экз. Заказ № 148.

Издательство СПбГУ. 199004, С.-Петербург, В. О., 6-я линия, 11/21

Тел./факс (812) 328-44-22 E-mail: info@unipress.ru www.unipress.ru

Типография Издательства СПбГУ. 199061, С.-Петербург, Средний пр., 41