

УДК 504.064.43/47:628.3/4-403/-405

О РАЗВИТИИ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НАД ГОРНОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ

Канд. геогр. наук А.Х. Ахмеджанов

Одним из признанных направлений в системе Казгидромета является физическое и математическое моделирование атмосферных процессов над горной территорией. Приведены основные этапы их развития. Полученные результаты пополняют наши знания о динамике воздушных потоков.

Влияние орографически неоднородной подстилающей поверхности сказывается на большинстве атмосферных процессов. В горных районах прогноз погоды, климата и загрязнений воздуха невозможен без учета влияния орографии.

Теоретические и экспериментальные исследования характеристик воздушных течений над горным рельефом в натуральных и лабораторных условиях, проводимые в последнее десятилетие, позволили установить ряд важных закономерностей динамики таких течений. Основные структурные изменения связаны с деформацией потока, что влечет за собой изменение значений составляющих скорости ветра, генерацию волн и роторов, возникновение островной турбулентности, блокирование потока препятствием, образование отрывных и возвратных течений. В большинстве исследований воздушного потока над горами рассматривались горы горизонтального масштаба в несколько десятков километров, крупномасштабные горные массивы, влияющие на общую циркуляцию атмосферы. Влияние гор с промежуточными масштабами: примерно от 100 до 1000 км, почти не исследовалось, хотя атмосферные движения таких масштабов являются важными в строении воздушных течений для данного региона.

Орографические возмущения атмосферы в пределах тропосферы, являющиеся причиной различных изменений в структуре воздушных потоков, все еще недостаточно изучены. При натуральных исследованиях трудно детально описать процесс обтекания элементов горного рельефа и, кроме того, они являются дорогостоящими. Теоретическому решению задачи мешает незамкнутость системы дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы, а также возни-

кающие при этом трудности в интерпретации ряда явлений из-за неполного выполнения критериев подобия. Указанные трудности в значительной степени ограничивают рамки применимости прямых экспериментальных методов исследования. В связи с этим большой интерес представляют физические модели, как инструмент для изучения структуры воздушного потока, возмущенного орографией, которые проще и дешевле натуральных экспериментов.

Основными этапами развития методов физического и математического моделирования в КазНИГМИ являлись:

- анализ существующих физических моделей стратифицированных воздушных потоков над горным рельефом и метеорологических данных о структуре воздушных течений в условиях орографически неоднородной подстилающей поверхности;

- создание физической модели стратифицированного воздушного потока для решения задачи обтекания горного хребта; исследование различных режимов течения, в том числе волнообразование, возникновение роторов и островной турбулентности; анализ профилей относительной скорости потока над препятствием; физическое моделирование распространения примеси в стратифицированном потоке над горным хребтом;

- реализация метода физического моделирования трехмерных потоков над высокогорными районами на моделирующей установке;

- математическое моделирование движения температурно-стратифицированных воздушных потоков над горной территорией;

- численное моделирование пограничного слоя атмосферы над горами.

Предложенный в [1 - 3] подход к параметризации стратифицированных течений в атмосфере и созданию физических моделей используется при моделировании стратифицированных воздушных течений в атмосфере над орографически неоднородной подстилающей поверхностью любой сложности. Физические модели могут быть использованы для расчета характеристик возмущений в атмосфере, создаваемых горными препятствиями. Они могут быть полезными при исследованиях влияния различных горных областей на атмосферу. Относительная простота физических моделей, не требующих значительных материальнотехнических затрат, позволяет осуществлять массовые эксперименты и расчеты структуры потока над препятствиями для решения практических задач метеорологии, атмосферной диффузии и физики атмосферы [4 - 12]. Из анализа уравнений динамической метеорологии вытекает комплекс критериев, соблюдение которых необходимо и достаточно для подобия стратифицированных потоков в атмосфере и многослойного потока водно-солевых растворов в модели. Комплекс состоит из денсиметрического числа Фруда для характеристики потока в целом, чисел Рейнольдса по слоям, подобия нормированных вертикальных профилей скорости и

плотности, а также геометрического подобия профилей препятствия [2 - 5]. Для моделирования распространения примеси необходимо, кроме задания условий соответствия параметров потоков, принять условия подобия источников. Основными параметрами источников являются диаметр трубы-источника, скорость выхода и температура газоздушной смеси, а также перегрев смеси относительно окружающей среды [5, 6]. В результате проведенных экспериментов на основе разработанной методики [7-11] были определены профили скорости движения потока над препятствием. В профиле скорости обнаружены два локальных максимума. В процессе эксперимента обнаружено возникновение роторных образований при обтекании препятствий полуцилиндрической формы и турбулентных зон, когда препятствием служит удобообтекаемое тело. Оба эти режима имеют место после двойного искривления профиля скорости в зоне глубокого минимума и сопровождаются волновыми процессами.

В формировании погоды очень важную роль играют упорядоченные вертикальные движения, которые влияют на явления, связанные с конденсацией водяного пара в атмосфере, образованием облачности и туманов. Возникновение вертикальных движений в атмосфере зависит от рельефа подстилающей поверхности, турбулентной вязкости, нестационарности атмосферных движений, архимедовой силой плавучести. Размеры областей и скорости вертикальных движений, устойчивость во времени и степень их воздействия на развитие атмосферных процессов, характер погоды изменяются в большом диапазоне в зависимости от причин, обуславливающих их возникновение. Рельеф подстилающей поверхности, являясь одним из основных причин возникновения вертикальных движений, влияет на размеры области, охваченных вертикальными движениями воздуха, и скорости этих движений. В связи с их большим практическим значением для прогноза облаков и осадков, предпринимались попытки инструментального определения вертикальных скоростей. В результате выяснилось, что ошибки наблюдения оказались соизмеримыми с величиной самой вертикальной скорости.

Приемлемым методом определения вертикальных движений является их расчет, основанный на использовании уравнений гидротермодинамики. Вертикальная скорость движения воздушных масс определялась из уравнения вихря скорости и неразрывности с учетом вклада приземного трения [13]. Влияние рельефа учитывается для основных изобарических поверхностей 850, 700 и 500 гПа. Расчетным полем считалась территория с координатами 30 - 50° с.ш. и 60 - 90° в.д., на которую была наложена сетка с шагом 10°. В узлах сетки задавались значения геопотенциала на плоскостях 500, 700 и 850 гПа для двух сроков. Далее строилась сетка с шагом 2° и вычислялись значения производной геопотенциала по времени, лапласиана геопотенциала и якобиана от геопотенциала и лапласиана

геопотенциала для двух сроков на указанных плоскостях, а также проводилось осреднение по времени этих функций. Для учета орографии вводилась сетка с шагом $0,5^0$. Значения вышеуказанных функций интерполировались на этой сетке. Затем вычислялся якобиан от геопотенциала и функции, описывающей форму орографии. Все полученные значения указанных функций дают возможность определить значения скорости вертикальных движений воздушных масс над горной территорией. Распределения областей восходящих движений удовлетворительно согласуются с зонами больших осадков в среднем за год. При западных и северо-западных вторжениях зона восходящих движений постоянно наблюдается в предгорьях хр. Каратау. Этот район является локальной зоной максимальных осадков.

Проблемы численных краткосрочного и долгосрочного прогнозов погоды, а также изучение общей и региональной циркуляции атмосферы находятся в настоящее время в такой стадии, когда их дальнейшее развитие зависит от правильного учета взаимодействия макро- и мезометеорологических процессов. Поэтому крайне важно иметь знания о структуре и внутреннем механизме мезопроцессов. На современном этапе уже начали развиваться методы локальных прогнозов погоды, которые учитывают термическую и орографическую неоднородности подстилающей поверхности.

При мезопроцессах взаимодействия между различными физическими факторами описываются нелинейными уравнениями из-за небольшого характерного масштаба. Поэтому линейаризация уравнений, которая обычно применяется для облегчения решения задач, в мезометеорологии в ряде случаев либо вообще недопустима, либо приводит к решениям, физическая интерпретация которых весьма затруднена. Особые трудности, на которые наталкиваются при изучении вопросов движения воздушных масс над горами, связаны с тем, что существующая метеорологическая сеть, с точки зрения мезометеорологии, слишком редка. Поэтому экспериментальные данные, чаще всего, могут быть получены лишь на основе специально поставленных наблюдений в стационарных или экспедиционных условиях. Это возможно для конкретно выбранных районов. Пространственные задачи движения воздушного потока над выбранным локальным горным рельефом, с учетом вертикального ускорения, реализуются аналогично задачам, рассмотренным в [14]. Для примера был проведен эксперимент по обтеканию воздушным потоком с западного и северо-западного направлений хр. Каратау, который является отрогом Центрально-Азиатского горного массива. Его средняя высота около 800 м, имеются вершины высотой более 1 км, в целом гребень имеет существенный наклон. При натекании западного потока на этот хребет происходит подъем воздушных масс по наветренному склону, а далее опускание на подветренном. Особенностью режима при обтекании является смещение линий тока в районе гребня в сторону падения

высоты хребта. Наблюдается снос траекторий движения воздушных масс уже при подъеме воздуха на наветренном склоне.

Турбулентный пограничный слой атмосферы формируется под влиянием динамического и теплового взаимодействия воздушного потока с подстилающей поверхностью. При движении воздушных масс над орографически неоднородной поверхностью оба вышеуказанных фактора имеют место. В естественных условиях это приводит к сложному вертикальному расслоению атмосферы и полю турбулентности. Для расчета характеристик структуры пограничного слоя атмосферы над горной территорией была применена методика расчета ГГО, разработанная Б.Г. Вагером и Е.Д. Надежиной [5] для орографической однородной поверхности. В эту модель вводились условия орографической неоднородности подстилающей поверхности. В ней были сделаны следующие допущения:

- рассматриваются стационарные процессы;
- поля метеорологических характеристик однородны по оси Y;
- продольная горизонтальная диффузия пренебрежимо мала.

Замыкание системы уравнений пограничного слоя атмосферы проводится с помощью гипотезы Буссинеска, соотношений Колмогорова и уравнений для кинетической энергии турбулентности и масштаба последней. Модифицированная программа расчета характеристик пограничного слоя атмосферы позволяет определить вертикальные профили метеоэлементов через определенный шаг по горизонтали, что даст возможность проследить процесс изменения их профилей в процессе движения потоков. Нижняя граница подстилающей поверхности задавалась в виде $Z = f(x)$, где $f(x)$ - функция рельефа.

Результаты расчетов распределения метеоэлементов в пограничном слое подтвердили выводы [4] о возможности возникновения зон островной турбулентности над препятствием. В этих зонах наблюдаются области с резким увеличением турбулентности. Это могут быть зоны турбулентности ясного неба, которым сегодня уделяется очень большое внимание.

В настоящее время проводятся исследования влияния гор юга и юго-востока Казахстана на динамику атмосферных процессов и распределение атмосферных осадков в этих районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка методов физического и математического моделирования обтекания разнородных подстилающих поверхностей стратифицированным потоком атмосферы: Отчет о НИР (заключительный) / Казахский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (КазНИГМИ); Ответственный исполнитель Х.А.Ахмеджанов - N ГР 73021928. - Алма-Ата, 1974. - 151 с.

2. Ахмеджанов Х.А., Гельмгольц Н.Ф., Нурумов С.Ж. Использование метода моделирования при изучении проблем физической климатологии Мангышлака // Тр.КазНИГМИ. - 1973. - Вып. 43. - С. 128-143.
3. Ахмеджанов Х.А. Лабораторное исследование природы опасных явлений погоды // Тр.КазНИГМИ. - Вып.72. - С.129-137.
4. Нурумов С.Ж. О лабораторном моделировании процессов орографического волнообразования в стратифицированной атмосфере // Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана. - 1974. - Т.10, № 10. - С. 1083 - 1086.
5. Выполнить физическое моделирование обтекания воздушным потоком горных препятствий, характерных для метеополлигонов и особенностей распространения аэрозолей от наземных генераторов в этих условиях: Отчет о НИР (заключительный) / КазНИИ Госкомгидромета; Ответственный исполнитель А.Х.Ахмеджанов. - № ГР 0138.0013432. - Алма-Ата. - 72 с.
6. Ахмеджанов А.Х. Об одном методе лабораторного моделирования распространения примеси над препятствием / КазНИИ Госкомгидромета. - Алма-Ата, 1983. - 5 с. Деп. в ВИНТИ 23.12.83, № 70.
7. Власюк М.П., Ахмеджанов А.Х. Применение лабораторного моделирования стратифицированных потоков в атмосфере для исследования поля скоростей над препятствием / КазНИИ Госкомгидромета. - г.Алма-Ата, 1984. - 7 с. - Деп. в ВИНТИ 22.11.84, № 7468-84.
8. Ахмеджанов А.Х. Способ лабораторного моделирования стратифицированного потока в метеорологической аэродинамической трубе / КазНИИ Госкомгидромета. - Алма-Ата, 1985. - 7 с. - Деп. в ВИНТИ, 28.01.85, № 789-85.
9. Ахмеджанов А.Х. К вопросу определения параметров стратифицированного потока над препятствием // Тр.КазНИИ Госкомгидромета СССР. - 1985. - Вып.83. - С. 23-30.
10. Ахмеджанов А.Х., Власюк М.П., Колесников М.И. О применении метода физического моделирования для планирования экспериментов по увеличению осадков с использованием наземных генераторов // Тезисы докладов III Всесоюзного семинара-совещания. - Тбилиси, 1986. - 15 с.
11. Ахмеджанов А.Х., Власюк М.П., Колесников М.Т. Разработка методов физического моделирования для исследования механизма деформирования воздушных потоков в горной области // Тезисы докладов Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. - Обнинск, 1987. - 23 с.
12. Ахмеджанов А.Х. К вопросу о критериях подобия в физической модели квазиламинарного устойчиво стратифицированного потока над горным хребтом // Тр.КазНИИ Госкомгидромета СССР. - 1987. - Вып. 99. - С. 118-122.

13. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч.1. - 3-е изд. - Л.: Гидрометеиздат. - 702 с.
14. Гутман Л.Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. - Л.: Гидрометеиздат, 1969. - 294 с.
15. Вагер Б.Г., Надежина Е.Д. Пограничный слой атмосферы в условиях горизонтальной неоднородности. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 135 с.

Казахский научно-исследовательский институт
мониторинга окружающей среды и климата

ТАУЛЫ АЙМАҚ ҮСТІНДЕГІ СТРАТИФИКАЦИЯЛЫНҒАН АУА АҒЫНЫ ҚОЗҒАЛЫСЫНЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҮЛГІЛЕРІНІҢ ДАМУЫ ТУРАЛЫ

Геогр. ф. канд. А.Х. Ахметжанов

Таулы аймақ үстіндегі атмосфералық процессті физикалық және математикалық үлгіге салу Қазгидромет саласында бірден-бір (танылған) бағыт болып отыр. Олардың дамуының негізгі кезеңдері келтірілген. Алынған қорытындылар біздің ауа ағыны қозғалыстары туралы білімімізді толықтырады.