Численные гидродинамические модели для решения задач локального переноса примесей в условиях сложной орографии, в том числе - над урбанизированной территорией

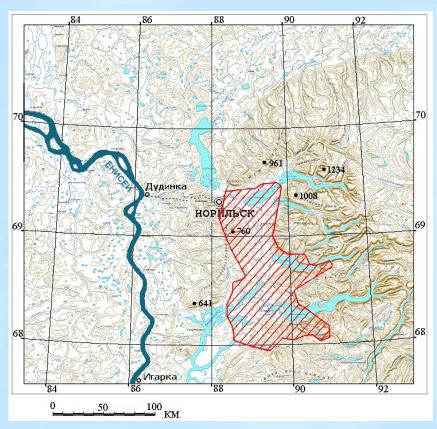
В.А.Шлычков

Модельный ряд представляет собой совокупность численных алгоритмов, в основу которых положены уравнения гидротермодинамики атмосферы, и предназначен для описания процессов пограничного слоя различных временных и пространственных масштабов.

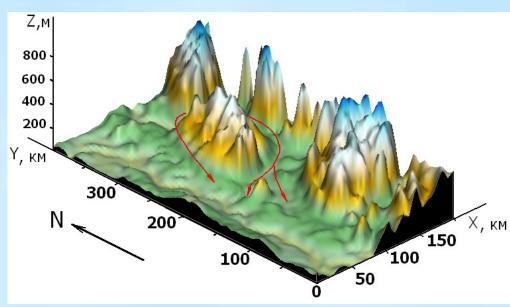
1. Пространственная мезомасштабная модель пограничного слоя воспроизводит явления с характерными размерами ~ 100 км. Описание наземного ландшафта обусловлено разрешающей способностью сетки, а процессы в непосредственной близости от подстилающей поверхности рассчитываюстя по упрощенной (параметрической) модели. Тем самым, городские территории в рамках такой модели учитываются весьма грубо.

Моделирование атмосферной циркуляции в Норильской долине

Влияние ГМК «Норильский никель» с валовым объемом эмиссии серы 2 млн т/год привело к массовой гибели лесов на обширной территории.

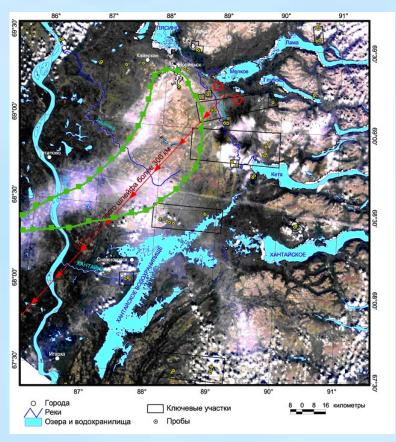


Штриховкой показана территория с пораженной растительностью по данным космического зондирования

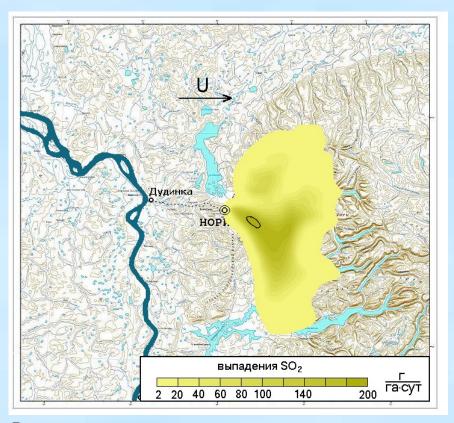


Норильск расположен в орографически сложной местности. С юга долина ограничена хребтами Лонгдокойский Камень высотой 600-700 м, а с севера и востока – горными системами Путоран с перепадами высот свыше 1000 м. Рисунок отображает отметки высот ЦМР.

Моделирование переноса серы в Норильской долине



На космоснимке изображен шлейф примеси, берущий начало в Норильске. Эта картина служила основой для верификации модельных расчетов. Зеленой линией показаны траектории трассеров, полученных расчетным путем. В целом можно констатировать качественное согласие путей миграции примеси с натурными данными.



В процессе сухого осаждения двуокись серы седиментирует на подстилающую поверхность. Рисунок иллюстрирует скорость накопления примеси на Земле. Максимум выпадений находится на расстоянии 40-60 км от центра эмиссии. Именно в этом районе регистрируется массовая гибель лиственницы. В целом отмеченная на рисунке территория близка к расположению площади угнетенных лесов.

Поле концентрации серы в вертикальной плоскости

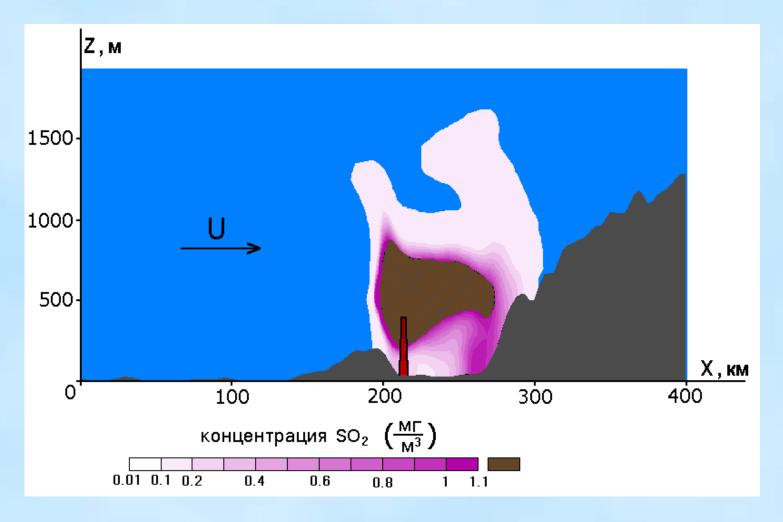
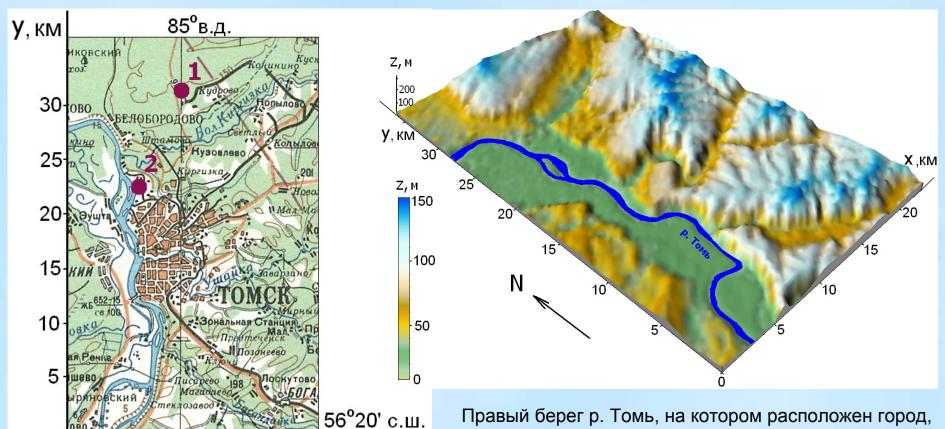


Рисунок показывает распределение концентрации в вертикальной плоскости, расположенной вдоль основного потока и проходящей через Норильск. Факел экстремальных концентраций находится на высоте, не достигая земли.

Перенос формальдегида в окрестности г. Томска

Практически во всех городах Сибири остро стоит проблема загрязнения атмосферы формальдегидом, годовые концентрации которого составляют 5 и более ПДК. Задача определения экологической нагрузки решалась на примере Томска на территории размером 23х36 кв. км.



В окрестности города находятся 2 основных источника нефтехимический комбинат (1) и шпалопропиточный завод (2) с консолидированной интенсивностью выбросов формальдегида ~46 г/с.

15

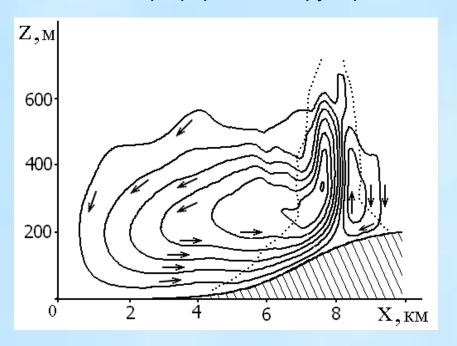
X,KM

10

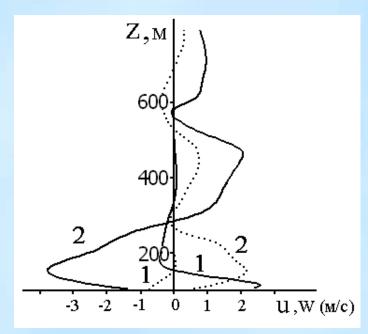
Правый берег р. Томь, на котором расположен город, имеет сложную орографическую структуру - долины речных притоков формируют пересеченный рельеф с перепадами высот 100-150 м.

Перенос формальдегида в окрестности г. Томска

При расчете ветрового режима учитывался орографический форсинг и наличие городского острова тепла. 5-градусный перегрев городской территории приводит к развитию бризовой циркуляции и формированию конвергентных потоков, обусловливающих подсос загрязненных воздушных масс от периферии к центру города.

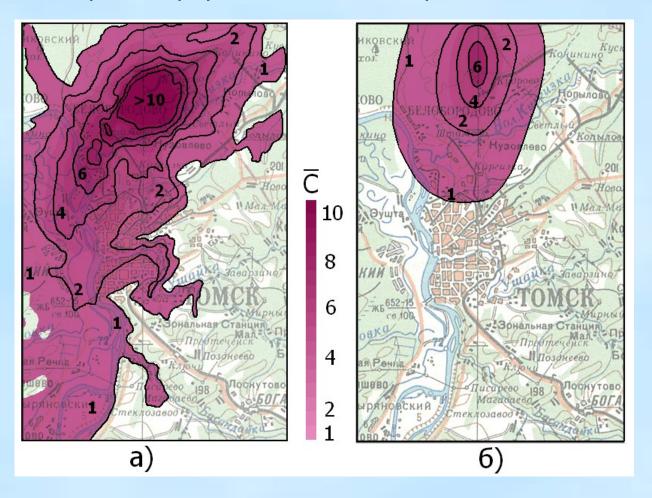


Между островом тепла и рекой, островом тепла и периферией города возникают бризовые ячейки неправильной формы. Орографические возмущения могут нивелировать или полностью подавлять термические движения.



Пример вертикального распределения компонентов скорости

Перенос формальдегида в окрестности г. Томска



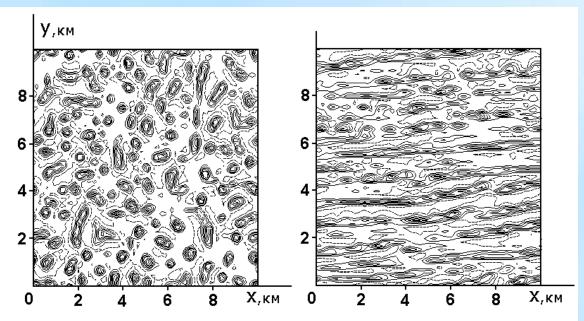
На рисунке а) показаны нормированные значением ПДК изолинии средней годовой концентрации формальдегида на уровне z=2 м, полученные по численной модели. Область влияния источников покрывает практически всю территорию города.

Рисунок б) иллюстрирует распределение концентрации по методике ОНД-86. Наличие сложнопересеченного рельефа обусловливает значительное повышение концентрации в городе.

2. Конвективные процессы в пограничном слое атмосферы и вихреразрешающая модель с явным воспроизведением когерентных структур.

При выраженном суточном цикле в АПС могут развиваться конвективные явления, которые сопровождаются интенсивным вертикальным массоэнергообменом. Традиционные подходы в моделировании не обеспечивают адекватного описания конвективных режимов. Вихреразрешающая конфигурация модели позволяет явным образом воспроизводить элементы стохастического конвективного ансамбля: термики, струи, облака.

Горизонтальная структура метеорологический полей при конвекции представляет совокупность термиков и струй, переносящих тепло и пар вверх. Характерная вертикальная скорость вихрей составляет 1 м/с.



Спутниковая фотография облачных полос вблизи побережья Джорджии

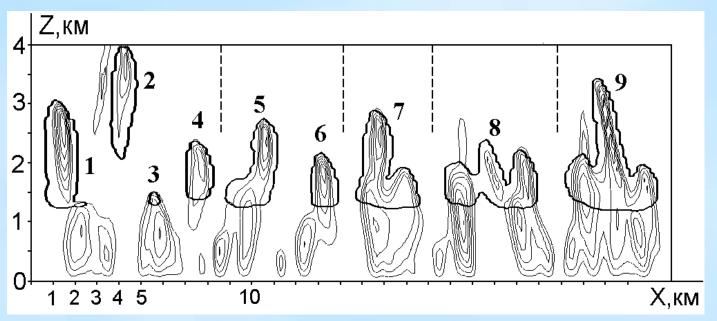


При западном ветре 5 м/с образуются дорожки вдоль ветра

Вихреразрешающая модель и конвективные процессы в АПС

При описании фазовых переходов влаги используются представления Кесслера. Схема влагооборота включает 5 фракций и 13 микрофизических потоков. По мере развития проникающей конвекции термики транспортируют влажный воздух в верхние слои. Достигая уровня конденсации, пересыщенный пар превращается в облачную воду, которая в процессе коагуляции образует влагу жидких осадков. Облака генерируются на вершинах термиков и в ходе развития формируют собственную динамику, не связанную с родительскими структурами.

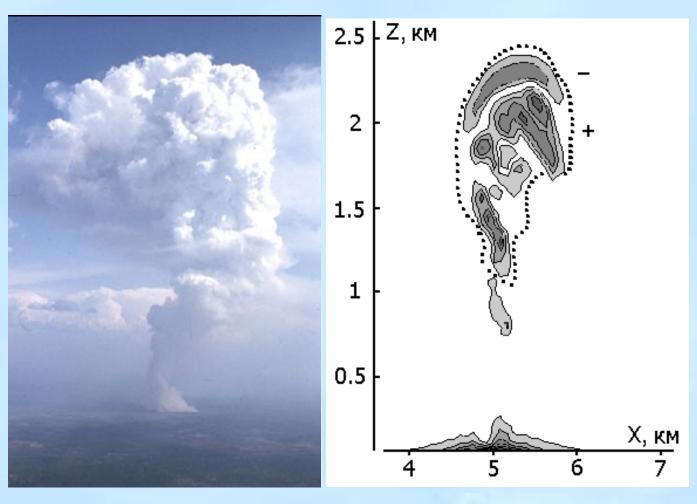
На рисунке представлены отдельные элементы модельного облачноконвективного ансамбля. Тонкие линии показывают вертикальную конфигурацию термиков, жирные линии – контуры облаков.



Вихреразрешающая модель и конвективные процессы.

Формирование облака над зоной лесного пожара.

Анализ космических снимков показывает, что над одиночными лесными пожарами практически всегда образуется конвективная колонка с развитыми вертикальными движениями, что приводит к формированию мощного кучевого облака над очагом. На рисунке справа этот процесс воспроизведен с помощью вихреразрешающей модели, фото слева сделано с борта самолета.



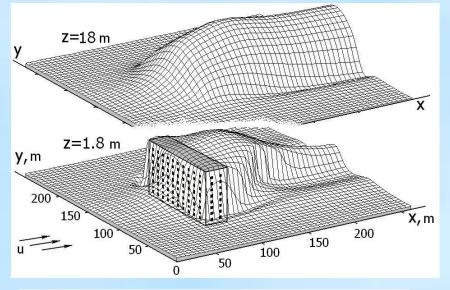
Определение полей концентрации атмосферных примесей над большими городами с использованием моделей, разрешающих отдельные здания и сооружения, достаточно громоздко в реализации и требует привлечения значительных вычислительных ресурсов для расчетов. Однако, зачастую требуется детализовать поля концентрации атмосферных примесей над какой-либо частью рассматриваемой области, например, микрорайоном города. В этом случае целесообразно на первом этапе использовать модель с достаточно грубым пространственным разрешением для определения полей концентрации атмосферных примесей в пределах всего города. А затем, на втором этапе с использованием полученных данных в качестве граничных и начальных условий, провести расчеты с детализацией полей концентрации с разрешением отдельных зданий и сооружений.

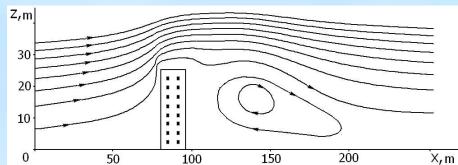
Для этих целей применяется микромасштабная модель приземного слоя атмосферы с прямым описанием элементов городской застройки. Модель реализована в пространственном и однослойном вариантах, причем преимущество последнего заключается в невысокой технической ресурсопотребности и, следовательно, возможности быстрого диагноза метеорологических параметров для при аварийных и залповых выбросах.

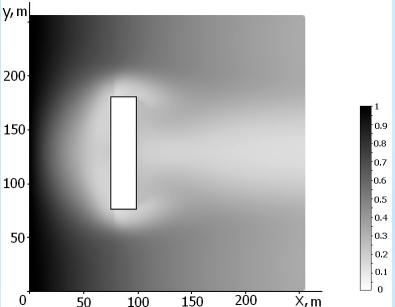
Фронтальное обтекание отдельно стоящего здания

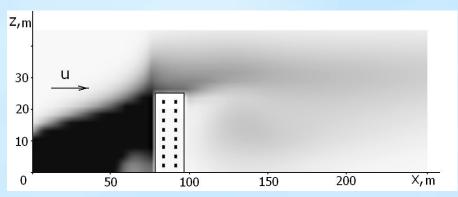
Траекторные поверхности образованы частицами с начальным положением на высотах $z=1.8\,$ и $z=18\,$ м

Изолинии функции тока в осевом вертикальном сечении. Ротор с подветренной стороны.







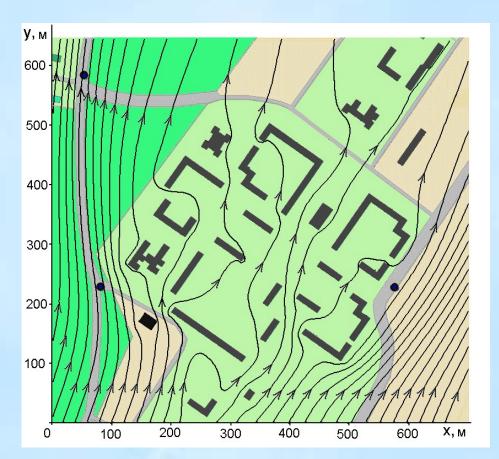


Поле концентрации примеси в вертикальной плоскости

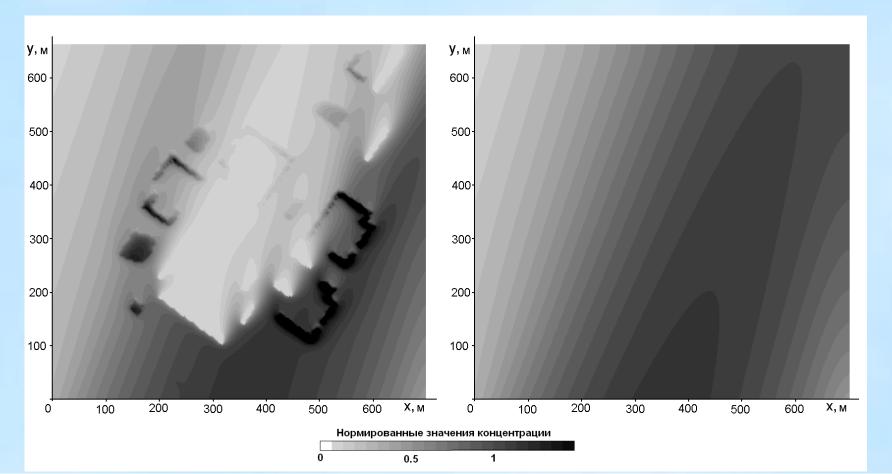
Поле концентрации. Вид сверху.

Воздушные потоки в городской застройке имеют сложный характер, обусловленный градостроительными особенностями ландшафта. Необходимо иметь представление о возможных направлениях и скорости распространения вредных веществ воздушным путем. Численная модель может дать детальную картину метеорологических полей над объектами городской инфраструктуры – разноэтажными зданиями, уличными каньонами и т.п.

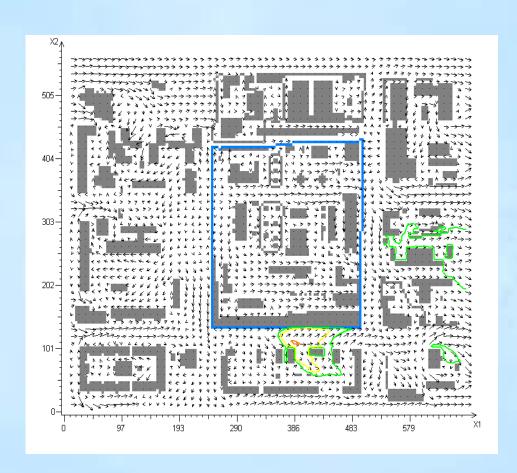
На рисунке представлен план одного из микрорайонов города, взятый из ГИС Новосибирска. Кривые со стрелками иллюстрируют геометрию траекторий при скорости потока 3 м/с и устойчивой стратификации приземного слоя. Отчетливо проявляются эффекты обтекания микрорайона как макроэлемента рельефа и торможения потока внутри кварталов.



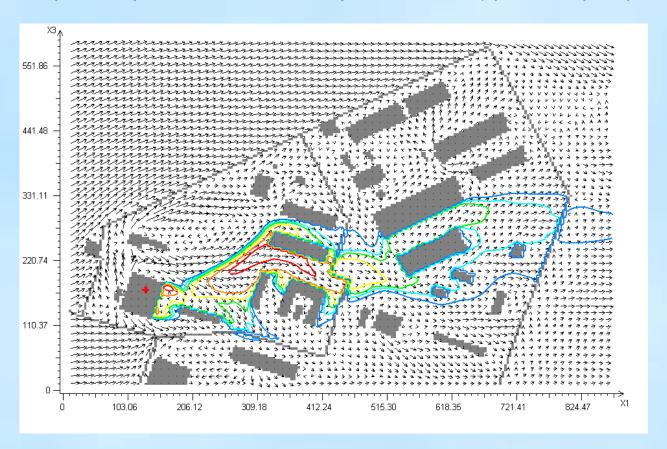
Источник эмиссии расположен на юго-востоке от центра микрорайона. Рисунок показывает поле концентрации примеси, полученное на основе численного экспериментирования. Высокие застройки в наветренной части перенаправляют поток примеси по периферии микрорайона, выполняя функции самозащиты. Вместе с тем, затрудненное проветривание территории создает опасность загрязнения от внутренних источников. Справа – концентрация на ровной поверхности.



- На рисунке изображено векторное поле скорости для западного направления ветра и изолинии ацетальдегида на высоте 1.5 м. в долях ПДК (зеленый 0.5 ПДК, желтый 1 ПДК, оранжевый 2 ПДК). Территория жирового комбината выделена, синим цветом.
- Проведена экспертная оценка загрязнения выбросами в атмосферу Новосибирским жировым комбинатом. Методика основана на численном решении системы уравнений Навье-Стокса методом крупных вихрей, с использованием динамической модели турбулентности подсеточного масштаба.
- Расчеты проводились с учетом существующей застройки для неблагоприятных метеоусловий при различных направлениях скорости ветра.



 На рисунке представлены результаты моделирования векторного поля скорости и изолиний концентрации на высоте 2 м. внутри многоэтажной застройки от источника примеси расположенного на крыше здания (красный крест).

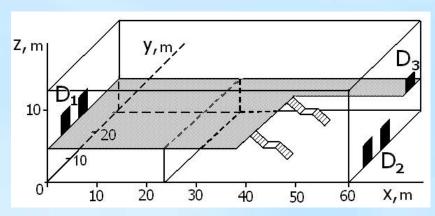


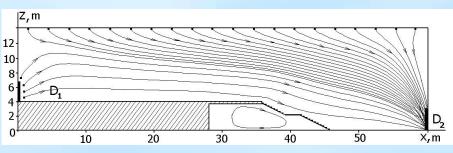
4. Моделирование циркуляции воздуха в закрытом помещении сложной геометрии

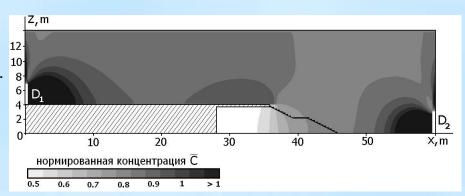
На рисунке показано внутреннее пространство торгового центра в новосибирском Академгородке. Торговые площади располагаются на двух этажах, расположенных уступом и соединенных двумя лестничными маршами. На внешних торцевых стенках имеются парные дверные проемы D1, D2. В потолке второго этажа встроено оборудование принудительной вентиляции, представляющее систему нагнетающих люков. Рассматривается процесс распространения аэрозоля при его поступлении внутрь через систему вентиляции и ставится задача оценки поля С.

Взаимодействие наддува, свободных сквозных потоков через двери и деталей интерьера обусловливает формирование течения сравнительно сложной структуры, которое является определяющим фактором перераспределения концентрации.

Следующий рисунок показывает расчетное поле концентрации при наружных штилевых условиях. В нише под перекрытием формируется застойная зона. Заметное скопление примеси наблюдается вблизи выходных дверей, где С ~ 3. Это объясняется конвергенцией потока примеси при ограниченной пропускной возможности дверных проемов.







Области применения моделей атмосферного пограничного слоя

- Как компонент технологической системы краткосрочного локального прогноза погоды.
- Оценка риска опасных погодных явлений: шквальных ветров, заморозков, туманов, сильных гроз...
- Прогнозирование явлений, опасных для авиации: зон интенсивной турбулентности по трассе, мощной кучевой облачности, обледенения, пределов видимости, гололедицы и туманов в аэропортах.
- Перенос газоаэрозольных примесей в атмосфере, расчет выпадений, траекторный анализ и решение обратных задач идентификации источников эмиссии загрязнителей.
- Оценка зон загрязнения при аварийных и залповых выбросах в атмосферу.
- Проведение экологических экспертиз, лицензирование промышленного использования территории.
- Оптимизация размещения систем атмосферного мониторинга.
- Гидродинамическая интерпретация данных космического зондирования атмосферы и детализация распределения метеорологических элементов в нижней тропосфере.
 Коррекция космической информации с помощью численной модели.
- Региональная оценка негативных последствий изменения глобальных климатических параметров.

Информационно-моделирующий комплекс для оперативного решения задач локального переноса загрязнений в городской атмосфере.

Функциональные блоки и потоки информации.

