

# **ВЛИЯНИЕ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПРОЗРАЧНОСТЬ ЗАПЫЛЕННОГО ВОЗДУХА**

***В.М. Хазинс***

Исследовано взаимодействие ветрового потока умеренной интенсивности ( $U_0 = 10$  м/сек) с орографическим возмущением, представляющим собой плато высотой 2 км с гладкими склонами. Продемонстрировано развитие интенсивного вихревого процесса. Показано, что над преградой воздух, переносящий взвешенную пыль, просветляется по сравнению с набегающим потоком.

## **Введение**

В работе [Хазинс, 2008] анализируются основные проблемы, связанные с распространением Азиатского Коричневого Облака (Asian Brown Cloud-ABC) при наличии орографических возмущений. Экспериментальные исследования позво-

лили установить, что высота аэрозольного облака в равнинной части поверхности достигает примерно 3 км над уровнем моря с максимумом нагрева на высоте 2 км [Ramnathan et al., 2007]. В гористой местности верхняя граница АВС поднимается и, например, над Тибетом достигает в отдельных областях тропопаузы. Горные хребты являются механическим препятствием на пути ветрового потока. Обтекание препятствия нагретым, содержащим взвешенные частицы, воздухом приводит к развитию завихренности над препятствием и формированию крупномасштабных вихрей, способствующих перемешиванию слоев воздуха и переносу пыли в верхнюю часть тропосферы. В результате прозрачность воздуха над преградой, с одной стороны, увеличивается за счет уменьшения концентрации пыли при увеличении скорости потока над преградой, а, с другой стороны, уменьшается за счет увеличения вертикального размера столба пыли. В пользу переноса пыли вверх над преградой свидетельствуют [Еланский и др., 2003] численные эксперименты по обтеканию достаточно гладкого профиля Антарктического полуострова с основанием 300 км и максимальной высотой 1600 м. При скорости ветра 20 м/с линии тока в тропосфере сворачиваются в круговую структуру, то есть формируется интенсивный вихрь.

Работа [Еланский и др., 2003], так же как и подавляющая часть исследований подобного сорта задач [Кожевников, 1999], выполнена исходя из условия стационарности формирующегося течения без учета турбулентных характеристик потока, что является некоторым приближением, особенно в условиях стратифицированной атмосферы. Кроме того, орографические эффекты исследуются обычно в приближении Буссинеска для несжимаемой жидкости, что справедливо для относительно небольших перепадов плотности [Ландау и Лившиц, 1986]. В то же время природные течения имеют ярко выраженный турбулентный характер. Несмотря на то, что описание турбулентного течения сталкивается с непреодолимыми трудностями из-за широкого спектра масштабов вихрей и стохастического характера процесса [Белоцерковский, Опарин, 2000], турбулентные течения можно рассматривать как организованное движение крупномасштабных структур с модельным перераспределением турбулентной энергии между вихрями. Подобный подход позволяет изучать турбулентные течения на современном уровне развития численного моделирования.

Корректное описание процесса обтекания ветровым потоком препятствия, высота которого сравнима с высотой тропосферы, задача чрезвычайно сложная [Кожевников, 1999]. В общем случае требуется решение системы полных уравнений Навье-Стокса. Для некоторых классов течений систему полных уравнений Навье-Стокса удастся упростить. В настоящей работе используется [Хазинс, 2010] упрощенная нестационарная модель для турбулентного потока вязкого сжимаемого газа, в которой опущены некоторые члены ввиду малости числа Маха. Турбулентная вязкость моделируется методом крупных вихрей.

## Постановка задачи

Целью настоящего исследования является изучение процесса вихреобразования и переноса пыли ветром с учетом орографических неоднородностей. Для интенсификации вихрей склоны горного препятствия были выбраны достаточно крутыми. Рассмотрим преграду в виде высокогорного плато, вытянутого в направлении, перпендикулярном набегающему ветровому потоку, и пусть вдоль ветра профиль

поверхности представляет собой двухстороннюю ступеньку с гладкими переходами (склоны) от верхней части (плато) к основанию:

$$z = \begin{cases} H_0 \exp(-b_l^2 x^2), & -\infty < x < 0 \\ H_0, & 0 < x < x_p \\ H_0 \exp(-b_r^2 (x - x_p)^2), & x_p < x < \infty \end{cases} \quad (1)$$

Здесь область  $0 < x < x_p$  имитирует плато, расположенное на высоте  $H_0$ , а эффективная (см. ниже) ширина склонов определяется значениями  $b_l$  и  $b_r$ .

Задача рассматривается в двумерной постановке. Пусть из бесконечности ( $x < 0$ ) в сторону плато дует постоянный по высоте ветер, перенося взвешенную примесь, объемная концентрация которой от поверхности Земли до некоторой высоты  $H_d$  постоянна, а выше  $H_d$  пыль отсутствует. Внесенные препятствием возмущения по мере удаления от него постепенно затухают, и на достаточно больших расстояниях от препятствия скорость ветра становится такой же, как и в набегающем потоке.

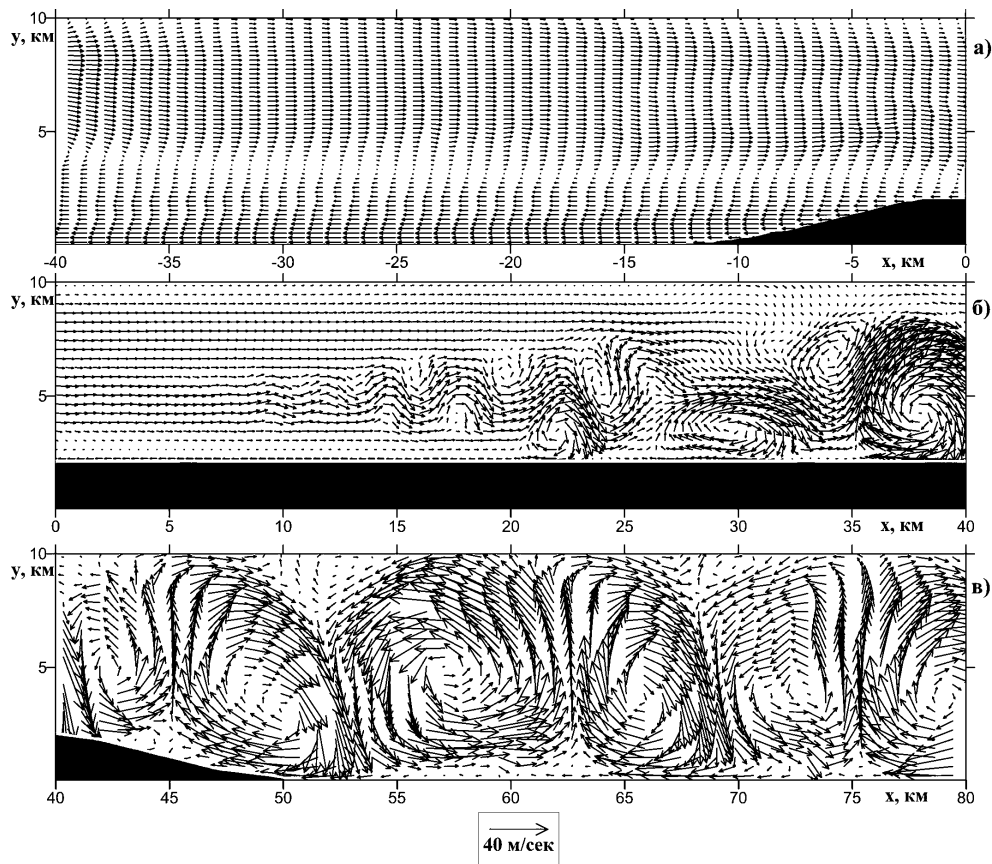
При численной реализации поставленная задача интерпретировалась следующим образом. Задача решалась в прямоугольной области. На некоторых расстояниях  $x_l$  и  $x_r$  слева и справа от плато соответственно ставилось условие втекания и вытекания с постоянной скоростью воздуха по высоте. На верхней границе, на расстоянии  $h$  от поверхности, предполагалось отражение возмущений от границы раздела (жесткая стенка). Значения  $x_l$ ,  $x_r$  и  $h$  выбирались из условия минимизации искажений потока над плато в области тропосферы и являются, в частности, предметом исследования настоящей работы. Склон аппроксимировался ступенчатой функцией, высота и ширина ступенек определялись шагом сетки. Граница склона задавалась точкой, где значение функции (1) становилось меньше шага сетки в вертикальном направлении. Эффективная ширина склона – расстояние от границы плато до границы склона. Вне плато и склонов нижняя граница расчетной области расположена на высоте ноль. На вертикальных участках склона реализовано условие жесткой стенки, а на горизонтальных участках, так же как и на участках нижней границы вне плато и склонов, так называемое условие прилипания: обе компоненты скорости – нули. Условие прилипания имитирует наличие трения вблизи поверхности. Отметим сразу, что численные эксперименты в рамках рассматриваемой задачи продемонстрировали незначительное изменение характеристик течения при смене условия прилипания на условие жесткой стенки.

Течение рассматривалось в стратифицированной атмосфере с высотой тропопавзы  $H_T = 11$  км. В качестве характеристики ветра было выбрано умеренное значение скорости  $U_0$ ,  $U_0 = 10$  м/сек. Высота плато  $H_0 = 2$  км. Шаг сетки по вертикали составлял 100 м, по горизонтали – 400 м. Первоначально верхняя граница области располагалась на высоте 15 км. Однако этого оказалось недостаточно, чтобы избежать влияния стратосферного течения на тропосферное, и размер расчетной области по вертикали был увеличен до 35 км. Эффективная ширина склона со стороны набегающего потока варьировалась в пределах от 6 до 24 км, но в этом диапазоне изменения ширины склона качественного отличия решений отмечено не было и в представленных расчетах шириной склона было выбрано значение 12 км. Ширина плато во всех вариантах – 40 км.

## Характеристики течения, инициированного взаимодействием ветрового потока с преградой

Для лучшей визуализации течения представим его в системе координат, движущейся со скоростью ветра  $U_0$ , и в этой системе будем обозначать скорость символом  $\tilde{V}$ . Здесь и далее поля скоростей приводятся на момент времени, когда течение практически установилось и это время составляет примерно 2 часа.

На рис. 1 приведено поле  $\tilde{V}$  для случая, когда оба склона имеют эффективную ширину 12 км, а расстояние от левой и правой границ расчетной области до склонов составляет 38 км. Черной заливкой отмечены плато со склонами. Поле представлено до высоты 10 км, так как тропосферные течения отделены от стратосферных в районе тропопаузы областью практически нулевых скоростей. Из рис. 1, а видно, что течение перед склоном представляет собой два почти параллельных разнонаправленных потока, меняющих направление на высоте 2–3 км. Нижний поток инициирован частично отражением от склона, частично условием прилипания. В этом варианте не удалось избежать взаимодействия набегающего от левой границы потока с отраженным от склона. Над плато (рис. 1, б) развивается интенсивное вих-



**Рис. 1.** Поле скорости  $\tilde{V}$  при обтекании симметрично расположенного относительно границ расчетной области плато

ревое течение, которое еще более усиливается при опускании потока по правому склону (рис. 1, в). Вихри неубывающей интенсивности распространяются вплоть до правой границы, в результате чего расчет вблизи правой границы оказывается некорректным и, в конце концов, в этой области развивается неустойчивость, приводящая к прекращению расчета. Отметим, что и в остальных представленных ниже вариантах расчет оканчивался таким же образом, причем неустойчивость развивалась примерно через один и тот же промежуток времени с начала расчета.

Чтобы оценить влияние правой границы на течение над плато, расчетная область справа была увеличена и длина от границы склона до правой границы области составила 78 км. Слева начальные данные не менялись. На рис. 2 представлено поле модифицированной скорости для этого случая (поле течения перед плато не приводится, оно аналогично рис. 1, а). Как следует из фрагмента 2, а, поле течения над плато принципиально не изменилось. В то же время увеличение расстояния до правой границы привело лишь к увеличению числа вихрей в области за правым склоном (рис. 2, б, в). Интенсивность вихрей убывает слабо и из расчета трудно сделать вывод, насколько надо увеличить в горизонтальном направлении область справа от плато, чтобы интенсивность вихрей затухла. В связи с этим в ва-

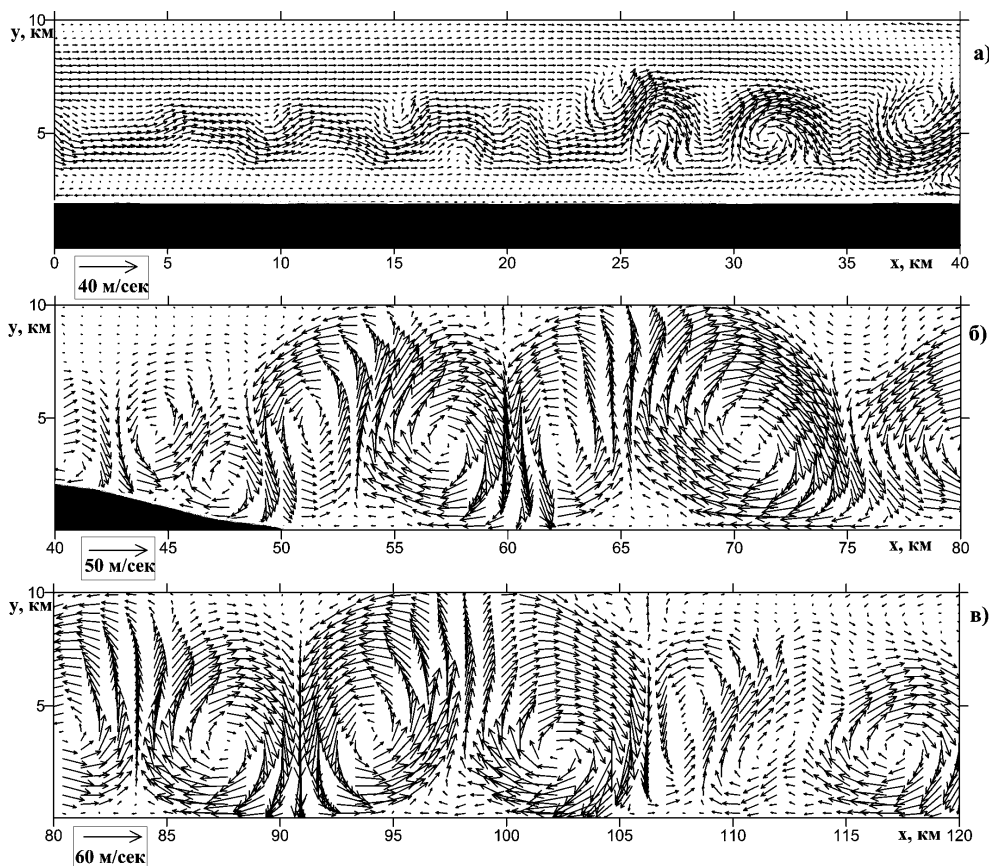


Рис. 2. Поле скорости  $\vec{V}$  при увеличенном расстоянии от склона до правой границы

рианте, аналогичном предыдущему, была предпринята попытка сделать более плавным правый склон, и проведен расчет, в котором ширина правого склона составляла около 45 км при расстоянии от склона до правой границы также равном 45 км. Поле течения над плато в этом расчете также принципиально не изменилось, но и интенсивность вихрей за плато ослабить не удалось.

Таким образом, корректная постановка правого граничного условия вряд ли возможна в условиях постоянного шага по пространству. Однако некоторый оптимизм внушает то, что течение над плато практически не зависит от правого граничного условия. Поэтому окончательный расчет был проведен в условиях, когда шири-

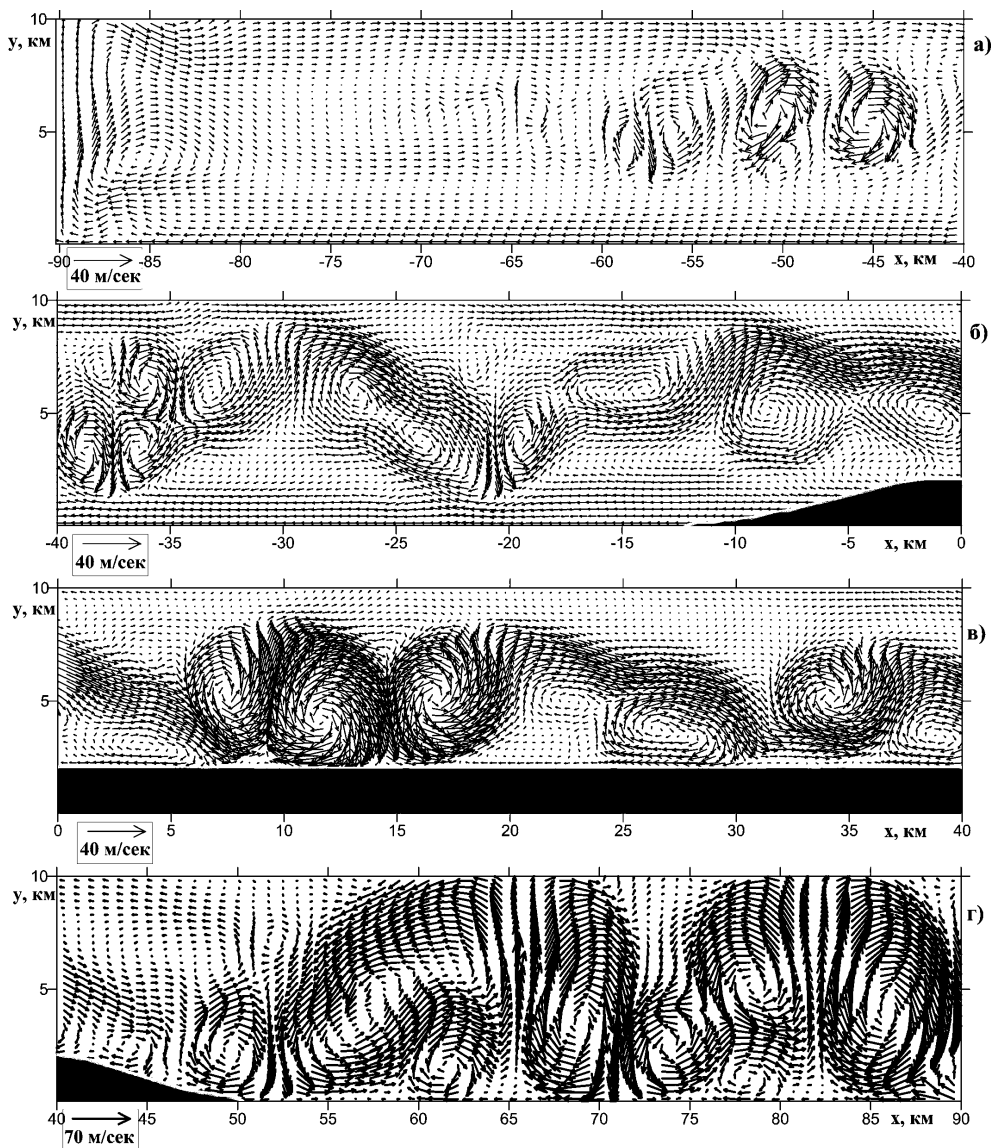


Рис. 3. Поле скорости  $\vec{V}$  при увеличенном расстоянии от левого склона до левой границы

на правого склона составляет 12 км, расстояние от правого склона до правой границы, как и в первом варианте – 38 км, но расстояние от левого склона до левой границы увеличено и составляет 78 км. В области, прилегающей к левой границе (рис. 3, а), при  $-80 < x < -70$  км значения  $\tilde{V}$  близки к нулю (что в неподвижной системе координат соответствует скоростям близким к скорости набегающего потока) за исключением зоны, прилегающей к поверхности, где происходит торможение потока. Область нулевых скоростей отделяет течение, развивающееся вблизи левой границы в результате несогласованности граничных условий с характеристиками внутреннего течения, от области, где развиваются основные возмущения, инициированные взаимодействием набегающего потока с преградой, что свидетельствует об отсутствии существенного влияния этих областей друг на друга. Вихри становятся заметными уже на достаточно больших расстояниях от преграды, начиная примерно с  $x > -60$  км. Расположены они на средних высотах тропосферы. По мере приближения к преграде вихри интенсифицируются и образуют «пояс» шириной в несколько километров, который колеблется от поверхности до тропопаузы (рис. 3, б). Над плоской поверхностью преграды формируется система нерегулярных вихрей, прилегающих к поверхности (рис. 3, в). Наконец за преградой (рис. 3, г), как и в предыдущих вариантах, образуется система вихрей, занимающих всю область тропосферы.

### Перенос пыли в вихревом потоке

Взаимодействие ветрового потока умеренной интенсивности ( $U_0 = 10$  м/сек) с орографическим возмущением, представляющим собой ступеньку высотой 2 км с гладкими склонами, приводит к формированию интенсивного вихревого процесса, который перемешивает воздух. В результате пыль, которая изначально локализована в слое воздуха, прилегающего к поверхности, может выноситься в верхние слои тропосферы. Продемонстрируем этот процесс. Пусть набегающий из бесконечности поток несет взвешенную, равномерно распределенную в воздухе, пыль, и запыленная часть атмосферы, как в случае Азиатского Коричневого Облака, ограничена высотой 2 км. Распространение пыли будем моделировать с помощью уравнения переноса концентрации примеси

$$\rho \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u^j \frac{\partial c}{\partial x^j} \right) = \text{div}(\rho D \nabla c),$$

где  $c$  – концентрация примеси,  $u^j$  – компонент вектора скорости,  $\rho$  – плотность,  $x^j$  – компоненты пространственных переменных,  $t$  – время,  $D$  – коэффициент диффузии, который связан с динамической вязкостью  $\mu$  числом Шмидта ( $Sc = \mu/(\rho D)$ ), значение которого близко к 1 [Лойцянский, 2003]. Используя полученные в газодинамическом расчете значения плотности, скорости и вязкости, можно получить распределение концентраций в потоке. Предполагается, что в запыленной части набегающего потока концентрация равна 1, вне запыленной области – 0.

На рис. 4 представлено распределение концентрации пыли к моменту времени, значительно превышающему время распространения пыли от левой границы до правой, то есть распределение пыли в газодинамической структуре. В области, прилегающей к левой границе (рис. 4, а), вследствие приграничных возмущений, продемонстрированных на рис. 3, а, пыль несколько перераспределяется в вертикальном направлении. Далее в течение некоторого промежутка времени (или, что

в данном случае то же самое, на некотором интервале  $\Delta$ ) вертикальное распределение концентрации пыли не претерпевает заметных изменений, и это распределение можно считать характеристикой пыли в набегающем потоке воздуха. В этой области в вертикальном направлении концентрация пыли до высоты 2 км примерно единица, а далее быстро падает, и на высоте около 5 км концентрация приближается к нулю. Вихревое течение захватывает сначала только верхнюю часть пылевого потока, вызывая квазипериодическое изменение высоты изолиний в правой части рис. 4, а. В последующем (рис. 4, б) вихри переносят пыль в более высокие слои тропосферы и к преграде распределение концентрации пыли по высоте, хотя и остается стратифицированным, но значение концентрации не превышает 0,5. Над преградой пыль еще более интенсивно перемешивается, выравнивая концентрацию по высоте (рис. 4, в) и, наконец, при приближении к правой границе (рис. 4, г) концентрация пыли становится практически однородной.

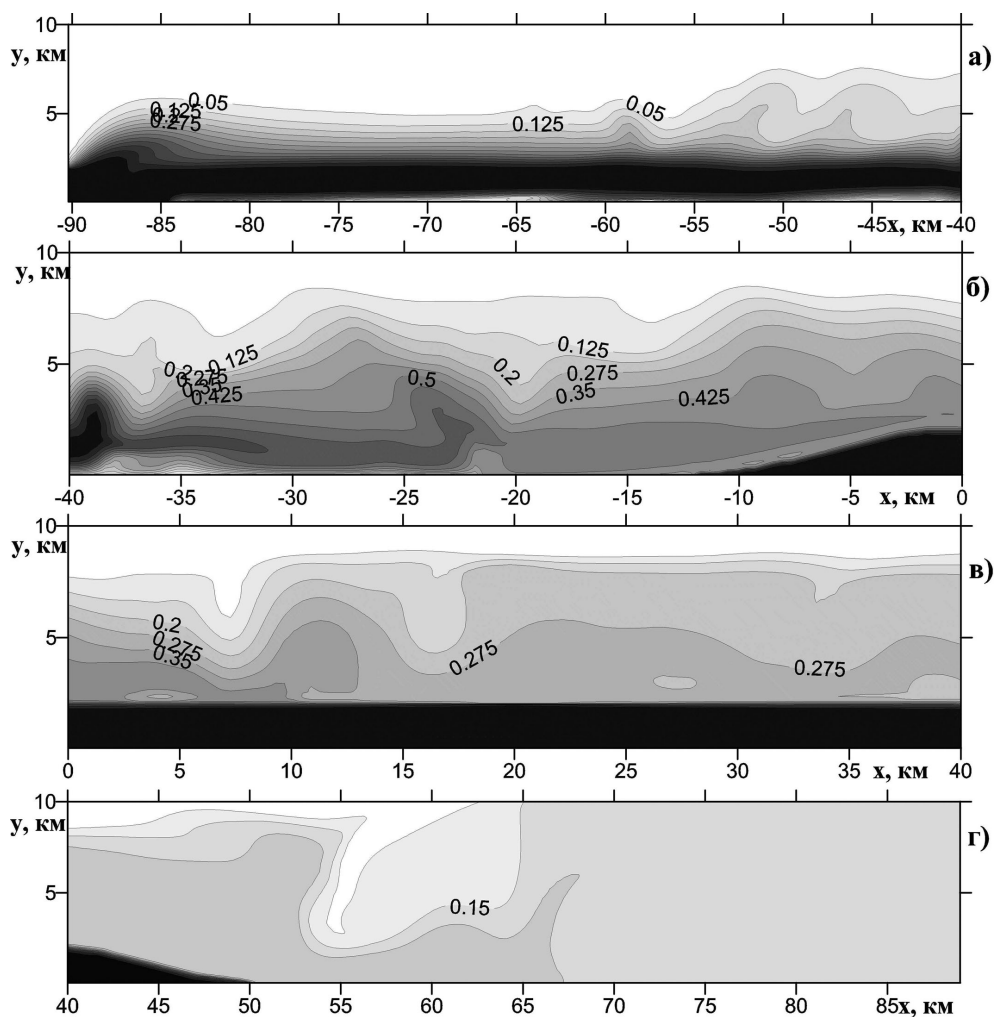


Рис. 4. Распределение концентрации пыли в потоке



Будем оценивать прозрачность воздуха по количеству пыли в вертикальном столбе с единичной площадью поперечного сечения. Проинтегрируем значения концентрации пыли по вертикали в каждой точке поверхности, и отнесем эту величину к аналогичному интегралу в какой-либо избранной точке из описанного выше интервала  $\Delta$ . Обозначим такое относительное изменение массы пыли в единичном столбе воздуха символом  $M_{rel}$ . На рис. 5 приведено распределение  $M_{rel}$  над поверхностью. В области перед преградой (рис. 5, а), где вихри слабо влияют на распределение пыли, значение  $M_{rel}$  почти не отличается от единицы, а в зоне интенсивных вихрей средняя величина  $M_{rel}$  по поверхности также близка к единице. Над поверхностью (рис. 5, б) относительная масса пыли заметно меньше единицы и близка к значению 0,5, то есть над поверхностью воздух становится прозрачнее по сравнению с набегающим потоком. Наконец по мере удаления от преграды значение  $M_{rel}$  постепенно приближается к единице.

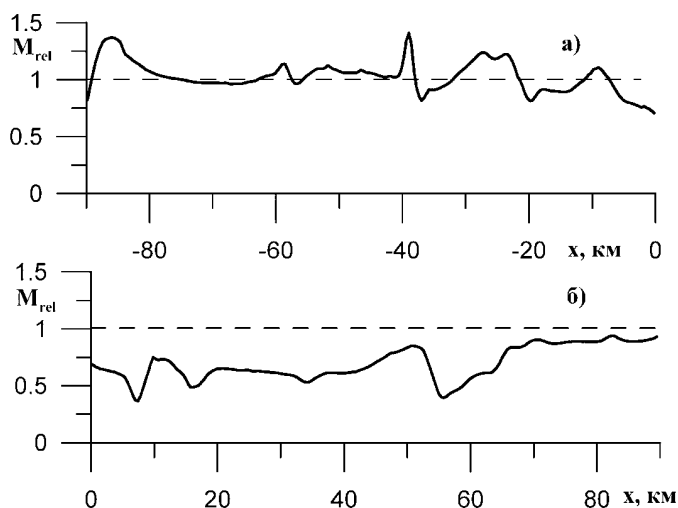


Рис. 5. Относительное изменение массы пыли в единичном столбе воздуха

### Заключение

Взаимодействие ветрового потока умеренной интенсивности ( $U_0 = 10$  м/сек) с орографическим возмущением, представляющим собой ступеньку высотой 2 км с гладкими склонами, приводит к формированию интенсивного вихревого процесса. Вихри появляются на достаточно большом удалении от преграды вверх по потоку, интенсифицируются при приближении к преграде и далее вихревой процесс охватывает практически всю область вниз по потоку, перемешивая слои воздуха вместе с содержащейся в нем примесью. В результате численного моделирования показано, что над преградой воздух просветляется вследствие уменьшения массы пыли в столбе воздуха по сравнению с набегающим потоком.

*Работа выполнена при поддержке контракта МНТЦ KR-1522 РАН и программы № 7 ОНЗ РАН.*

## *Литература*

*Белоцерковский О.М., Опарин А.М.* Численный эксперимент в турбулентности: От порядка к хаосу. М.: Наука. 2000. 223 с.

*Еланский Н.Ф., Кожевников В.Н., Кузнецов Г.И., Волков Б.И.* Влияние орографических возмущений на перераспределение озона в атмосфере при обтекании антарктического полуострова // Известия РАН ФАО. 2003. Т. 39. № 1. С. 105–120.

*Кожевников В.Н.* Возмущения атмосферы при обтекании гор. М.: Научный мир. 1999. 160 с.

*Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

*Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Дрофа. 2003. 840 с.

*Хазинс В.М.* Метод крупных вихрей в задачах всплытия высокотемпературных термиков в стратифицированной атмосфере // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 3. С. 424–432.

*Хазинс В.М.* Методика численного моделирования ветрового потока в условиях горной местности // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2008. С. 190–197.

*Ramnathan V., Ramana M.V., Rjberts G. et al.* Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption // Nature. 2007. V. 448. P. 575–578.