

Исследование свойств Новороссийской боры на основе аналитического нелинейного моделирования

Беданок М.К., Берзегова Р.Б., Кожевников В.Н.

ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»
МГУ им. М.В. Ломоносова

История возникновения проблемы

Данная работа посвящена изучению динамики взаимодействия движущейся атмосферы с неровностями земли., т.е. исследованию орографических возмущений, возникающих в атмосфере при обтекании гор. Это явление относится к среднemasштабным или локальным атмосферным процессам. Исследование данной проблемы ведется давно и связано с именами таких ученых как Дородницын А.А., Кибель И.А., Лира Г., Скорер Р.С., Лонг Р.Р., Смит Р.Б., Гранберг И.Г., Обухов А.М., Дюбюк А.Ф., Кожевников В.Н. и др. Наиболее успешно это делается методами гидротермодинамического моделирования.

I этап: линейные модели, использующие предположение о малости возникающих возмущений (во всех работах предсказываемые возмущения скоростей в разы превышали фоновые значения в натекающем потоке).

II этап: нелинейные модели (первая нелинейная модель создана Р. Лонгом).

Нелинейные модели **делятся на:**

- 1) закрытые (движение атмосферы рассматривается как движение жидкости в канале с горизонтальной крышкой);
- 2) открытые.

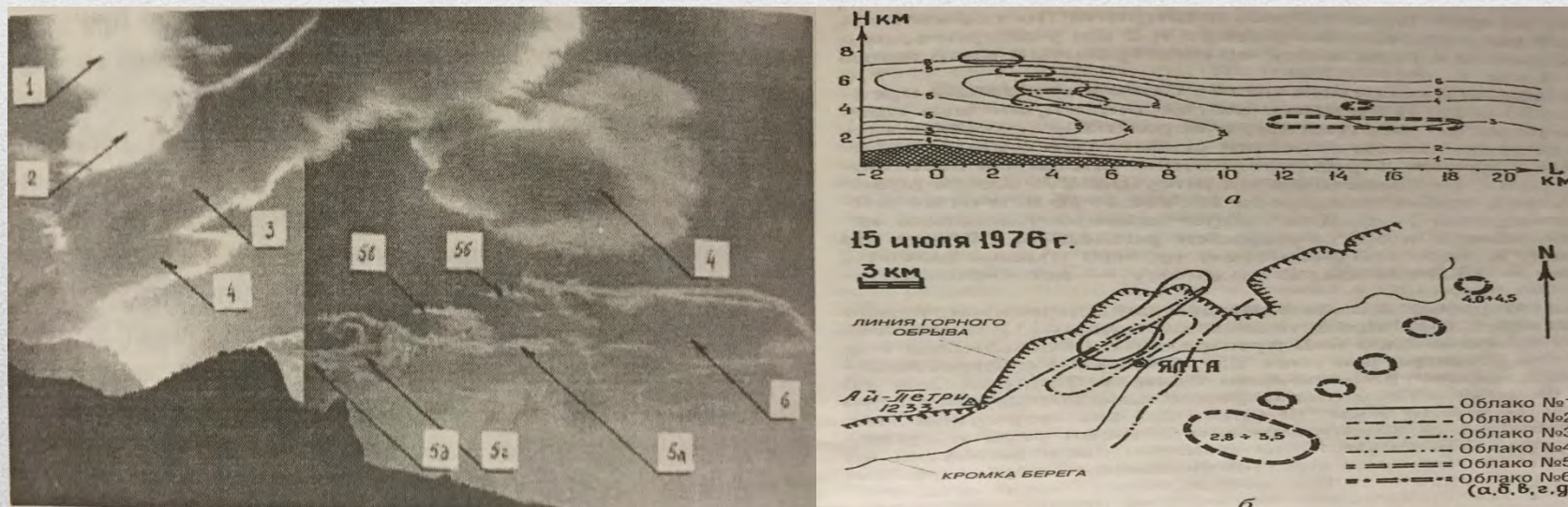
По принципу построения решения нелинейные модели **делятся на:**

- 1) аналитические модели (решение сводится к получению соответствующих формул);
- 2) численные модели (решение сводится к прямому численному решению исходных уравнений).

Для исследования свойств Новороссийской боры применяется аналитическая, нелинейная, двумерная, стационарная, открытая модель, рассматривающая явление в рамках среднего масштаба.

Верификация модели

Данная модель была применена для исследования возмущений атмосферы над горами Крыма в районе г. Ялта. В основу исследований были положены результаты экспедиционных наблюдений, проводившихся 08.09.1975 г. и 15.07.1976 г. Проведенные измерения дали возможность характеризовать поле облачности непосредственно над главным хребтом Крымских гор. А об орографических возмущениях мы судим по наблюдениям за облаками, причем главным образом типа *Ac lent*. Облака весьма тонко реагируют на изменения состояния атмосферы. Поле облачности близко к полю размещения в пространстве заметных положительных смещений частиц воздуха, осуществляющих обтекание гор. Использовались данные радиозондирования.



- **Облака лентикулярисы на Камчатке**



• Что такое бора?

Бора (от **греч.** βορέας — северный ветер; «борей» — холодный северный ветер) – это сильный холодный порывистый местный ветер, возникающий в случае, когда поток холодного воздуха встречает на своём пути возвышенность; преодолев препятствие, бора с огромной силой обрушивается на побережье. Вертикальные размеры боры — несколько сот метров. Затрагивает бора, как правило, небольшие районы, где невысокие горы непосредственно граничат с морем. В нашей стране наиболее известной является Новороссийская бора, под которой понимают появление катастрофически сильного ветра в городе и в Цемесской бухте, когда с северо-востока, перевалив через горы, в район приходит холодная воздушная масса.



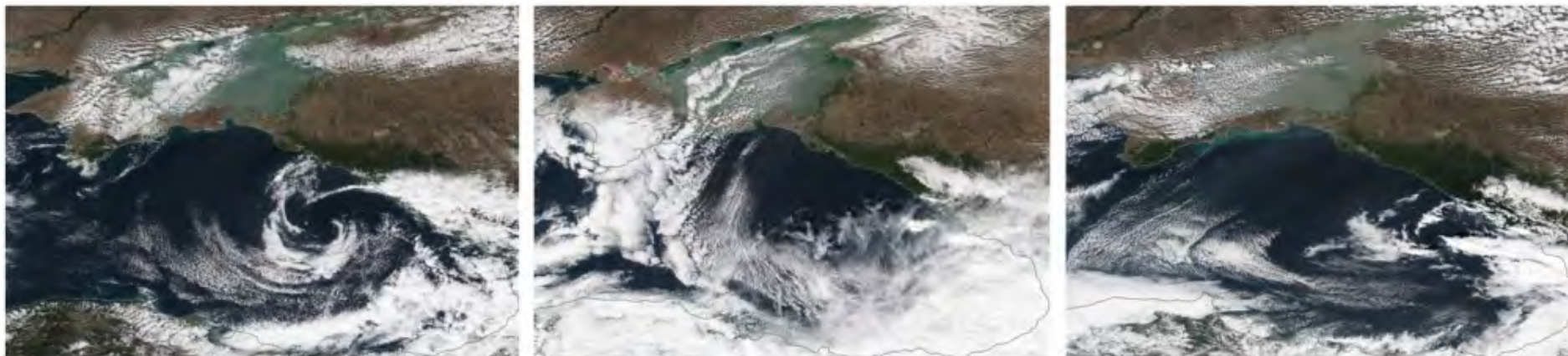
- **Новороссийская бора**



Новороссийская бора



Бора на оптических снимках



Бора на оптических снимках ИСЗ Suomi NPP от 28.09.2017 (09:51 UTC), 2.10.2017 (10:15 UTC) и 3.10.2017 (09:57 UTC). © NASA GSFC

Материал взят с сайта: <http://new.scanex.ru/company/news/ekstremalno-prodolzhitelnaya-chernomorskaya-bora-na-sputnikovykh-snimkakh/>

• Последствия боры



- **Последствия боры**



Теоретическая модель

$$\rho \frac{d\bar{\theta}}{dz} = \rho_1 \left(\frac{d\theta}{dz} - \lambda_c^{-1} N^2 \psi - \gamma \right) \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0$$

Возмущения температуры вычисляются по формуле:

$$T' = - \frac{(\gamma_a - \gamma)\psi'}{U}$$

Компоненты скорости определяются производными от функции тока по вертикали и горизонтали.

Рассматривается двумерный вариант стационарного адиабатического движения атмосферы. Вязкость и силы Кориолиса не учитываются. Скорость в невозмущенном натекающем потоке перед горами и вертикальный градиент температуры постоянны:

$$U = \text{const}, \quad \gamma = \text{const}.$$

Атмосфера представлена тремя слоями: тропосфера, нижняя стратосфера, а верхний слой неограничен по высоте. Свойства натекающего потока варьируются за счет масштаба Лира

$$\lambda_c = 2\pi \frac{U}{N} \quad (\text{собственная длина волны натекающего потока}).$$

Параметры модели

1) Исследования были проведены для значений:

$\lambda_c = 3, 4, 5, 6, 6.66, 7, 7.5, 7.8, 9.5, 10, 12.2$ км, $\gamma_j = 6, 0, 3$ град/км.

Заданным значениям вариаций λ_c соответствуют вариации скорости натекающего потока в диапазоне от 6 до 24.4 м/с.

2) Высоты поверхностей раздела равны 10 и 18 км.

3) Расчеты проводились до 30 км.

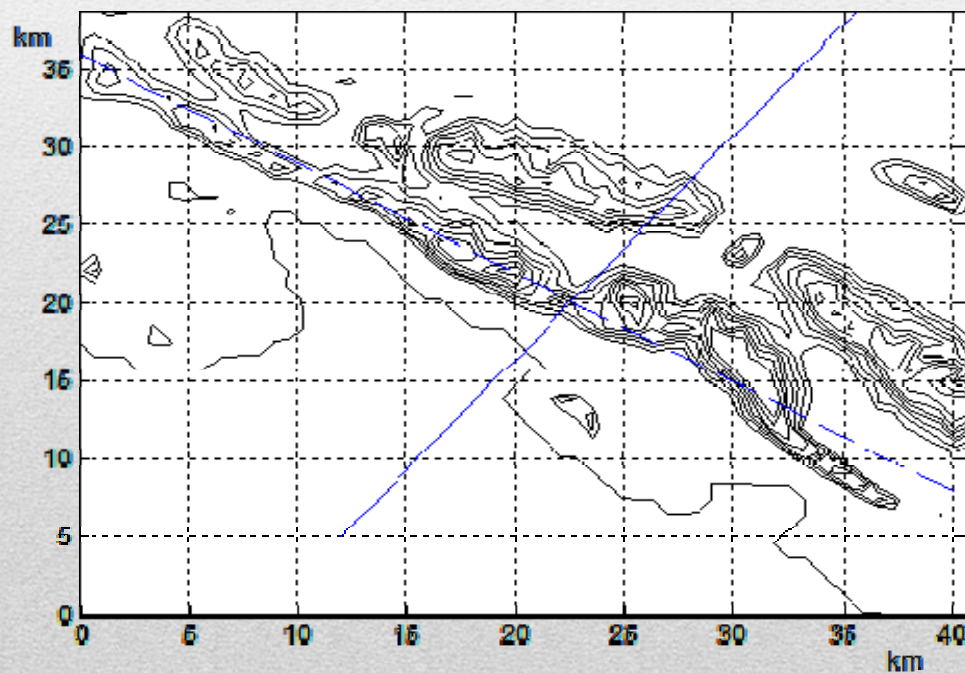
4) Учитывалось, что в закрытых моделях решение теряет смысл, когда половина масштаба Лира укладывается в вертикальной толщине канала целое число раз (резонанс в смысле Лонга). Предусмотрено включение в диапазон значений λ_c равных 4, 5, 6.66 и 10 км.

5) Учитывались длины волн, большие 3 км.

6) Шаги расчетной сетки составляли по x и z соответственно 50 и 250 м. Это обеспечивало высокое качество пространственного разрешения.

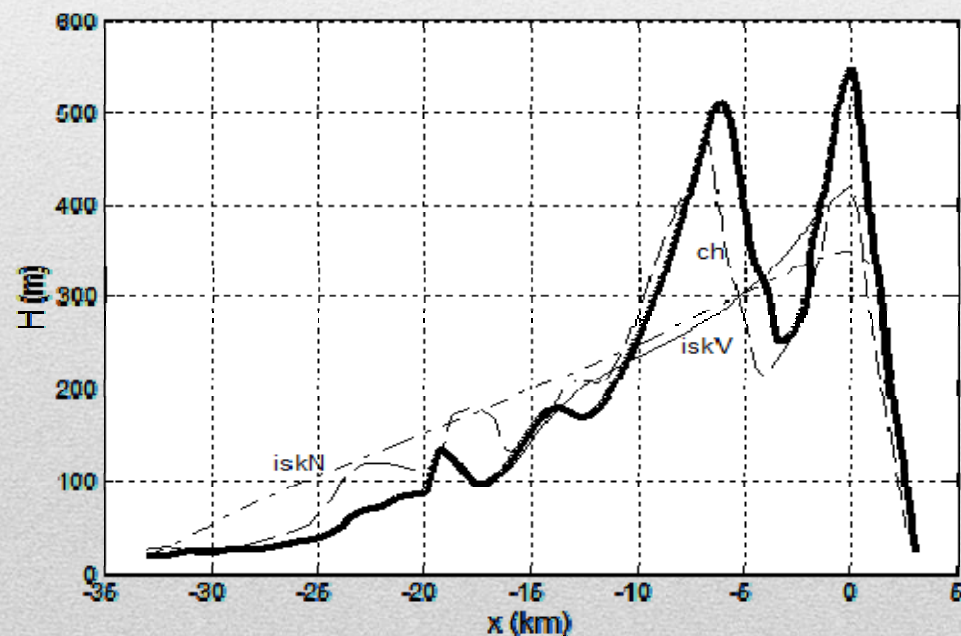
Изогипсы высот карты района г. Новороссийск

Двумерность модели подразумевает, что обтекаемый рельеф должен иметь цилиндрический характер, а его форма задаваться профилем в вертикальной плоскости (x, z) , ориентированной по направлению натекающего потока. Для определения двумерных характеристик реального рельефа использовались специально созданные программы обработки карты высот района г. Новороссийска.

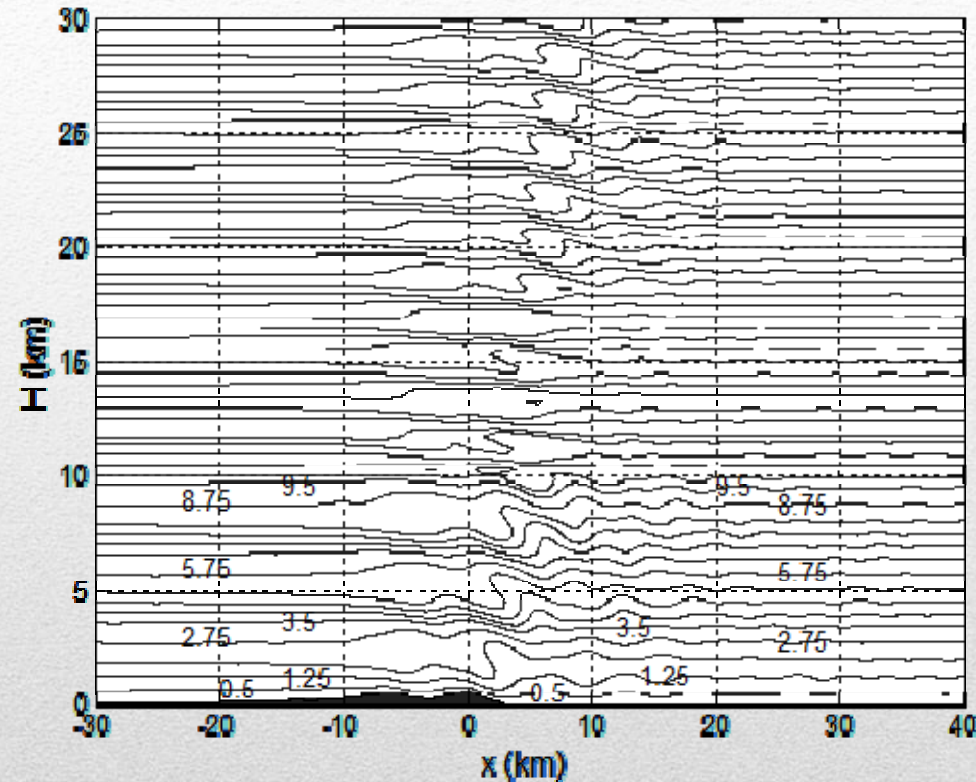


Рельеф

Исследования проводились при обтекании 4-х рельефов: среднего, частного (наиболее отличного от среднего) и двух искусственно созданных. Тем самым удалось выяснить как на орографические возмущения влияют такие характеристики рельефа, как максимальная высота гор, наличие нескольких хребтов и ложбин. В частности, получено, что наличие ложбины между двумя хребтами приводит к заметному возрастанию интенсивности возмущений в самых заметных гребнях волн над горами и в начале подветренной зоны, а при уменьшении высоты гор уменьшается размах смещения прежней траектории. Подтвердилось, что интенсивность возмущений в первую очередь зависит от высоты гор и во вторую – от их формы.

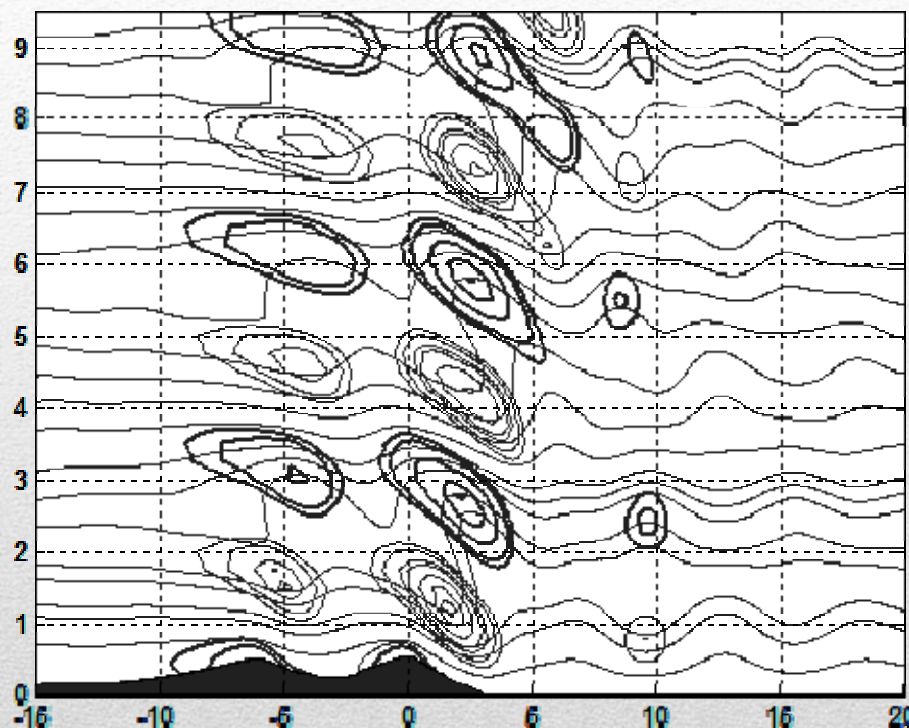


Орографические возмущения



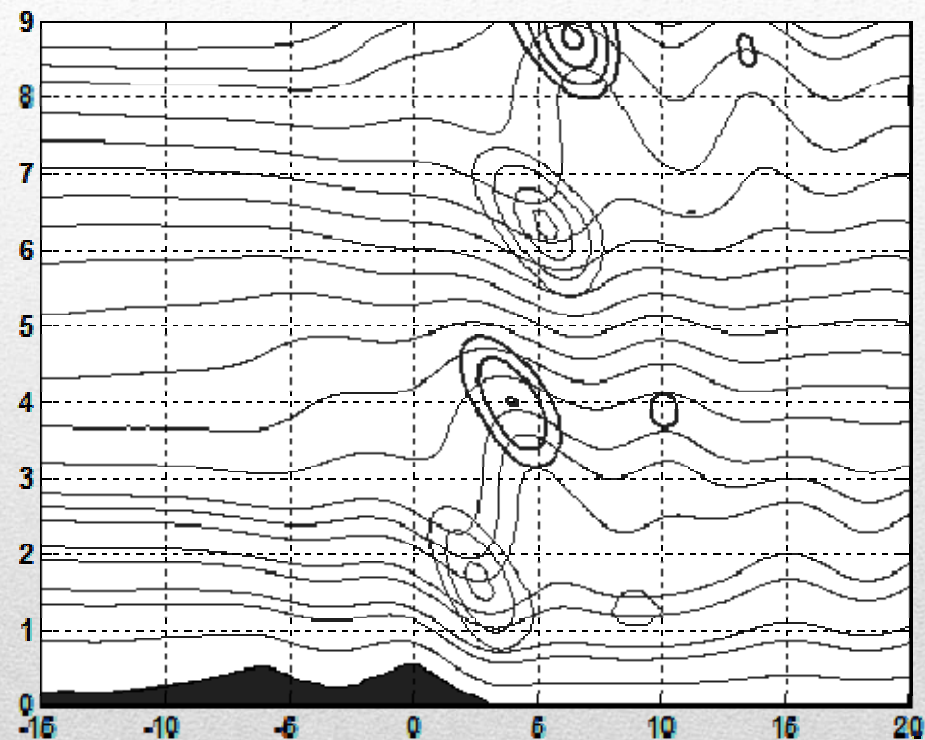
Траектории движения частиц воздуха при обтекании среднего рельефа для $\lambda_c=3$ км, $U=6$ м/с, $\gamma_f=6, 0, 3$ град/км. Отмечены траектории с z_0 , равными 0,5; 1,25; 2,75; 3,5; 6,5; 8,5; 9,5. Профиль рельефа закрашен. Траектории отождествляются по значениям их высот в натекающем потоке z_0 (в км).

Орографические возмущения и возмущения температуры



Представлены траектории с $z_0=0; 0,5; 1; 1,25; 1,75; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 8,75; 9$ и изолинии со значениями, данными в наборах $zVT_1 = - [1.2 \ 1.5 \ 2.2 \ 2.8 \ 3.1]$ и $zVT_2 = [1.3 \ 1.6 \ 2 \ 2.2 \ 2.6 \ 3 \ 3.2]$ в диапазонах высоты приближенно: области с $T' > 0$ - на высотах 0-2, 3,5-5, 6,5-8, ..., области с $T' < 0$ - соответственно 2-3, 5-6,5, 7,5-10, ... км. Траектории отождествляются по значениям их высот в натекающем потоке z_0 (в км).

Орографические возмущения и возмущения температуры



траектории с $z_0=0; 0,5; 1; 1,25; 1,75; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 8,75; 9$ и изолинии со значениями, данными в наборах $zVT_1 = - [2.4 \ 2.9 \ 3.4 \ 3.7]$ и $zVT_2 = [2.2 \ 2.7 \ 3.2 \ 3.5]$. Траектории отождествляются по значениям их высот в натекающем потоке z_0 (в км).

4) Области возмущения l располагаются в пространстве в определенном порядке. Они показывают, что возмущения имеют не просто волновой

Роторы

Наши выводы: в областях теоретического предсказания роторов возможны, например, устойчивое ламинарное течение или появление локальных очагов турбулентности или полное «обрушение волн».

Закономерность сглаживания

2) отклонение от линейности определяется процессами энергетического взаимодействия между выделенными слоями.

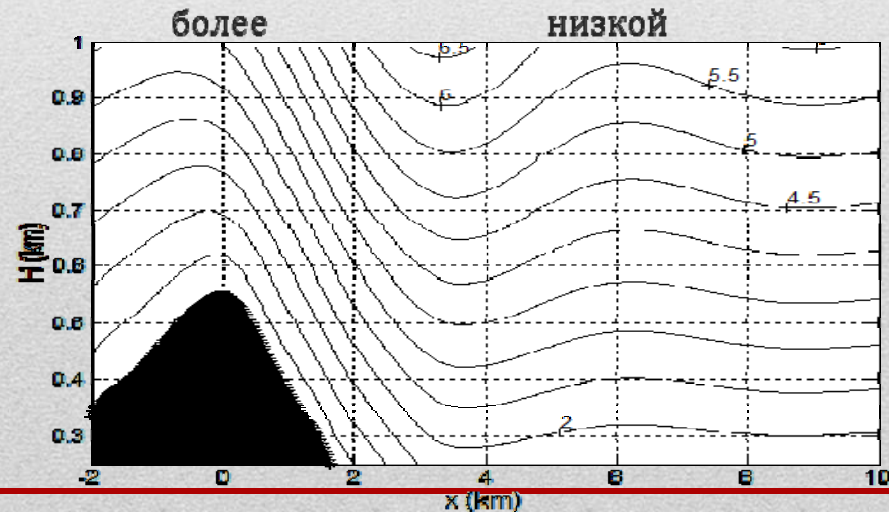
λ_c	3	4	5	6	6,7	7	7,5	7,8	9,5	10	12,2
z_0	2.5	2.0	2.5	4	3.5	4	5	4.5	4.5	6	3
$\Delta\left(\frac{\psi'}{U}\right)$	1.6	2.3	1.9	1.7	1.4	1.2	1.0	1.1	1.6	1.5	1.0
$\max T' > 0$	3.2	4.3	3.2	3.6	2.8	2.1	1.8	1.9	3.3	2.9	1.7
$\min T' < 0$	-3.1	-4.4	-3.4	-2.9	2.7	-2.4	-2.1	-2.2	-3	-2.9	-2.1

Свойства орографических возмущений

вид струи. В верхней части струи имеет место сходимостъ траекторий, в нижней-расходимостъ. Следовательно, на некотором среднем уровне скорости достигают своего максимума. С высотой наклон струй изменяется, при том сгущение траекторий уменьшается. Поэтому у подветренного склона гор скорость в струе максимальна. Тогда значения максимальной скорости у подветренного склона гор могут использоваться в качестве меры интенсивности орографических возмущений при обтекании. При исследовании энергетики Новороссийской боры необходима скорость струи у подветренного склона гор. При исследовании температурных характеристик боры необходимы возмущения T' .

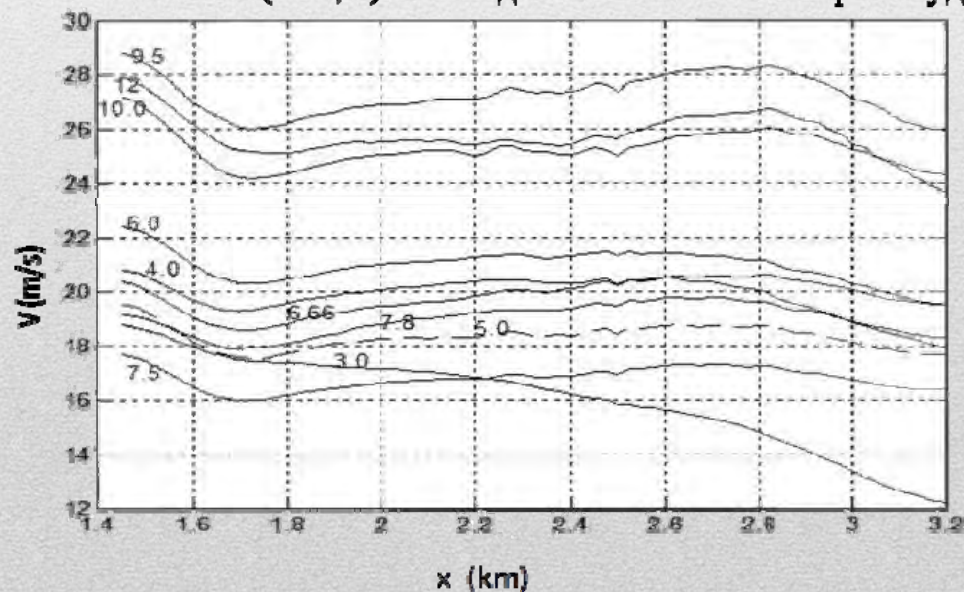
Свойства орографических возмущений

становятся положительными. При этом во всех вариантах в потоке у склона толщиной порядка 1 км и в приземном слое за горами толщиной 300 м возмущения только положительны и лежат в диапазоне 0 – 1.5 градуса. Это соответствует закону адиабатического нагревания здесь частиц воздуха. Значит, известные резкие понижения температуры при боре определяются не процессом обтекания, а тем, что в район города и моря поступает воздушная масса более низкой температуры.



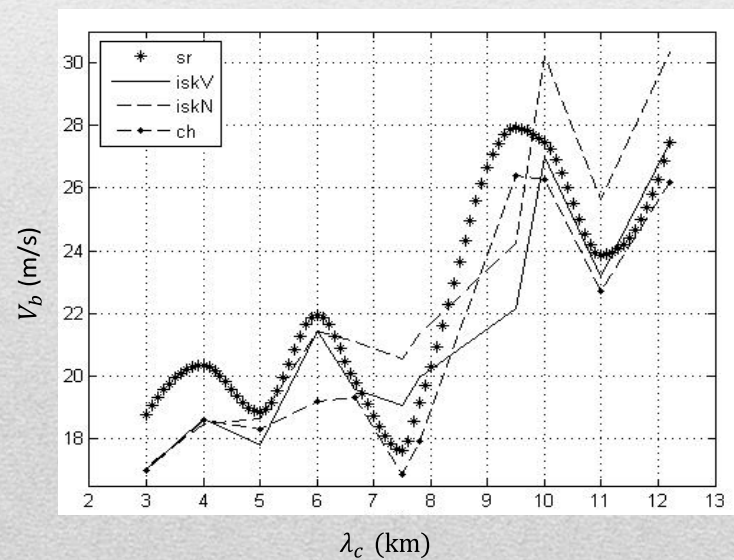
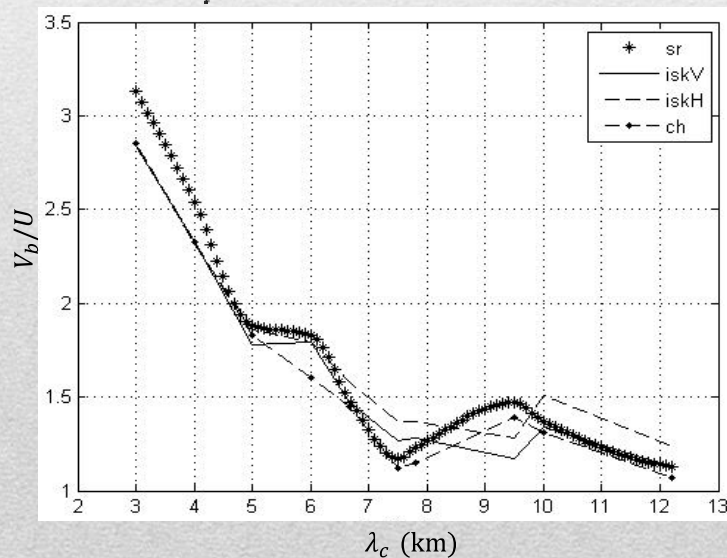
Энергетика боры

горой на уровне $z=300$ м. Этот уровень рассматривался как характерный. Были рассчитаны изменения модуля скорости $V(300, x)$ в зависимости от x . Выяснилось, что струя у подветренного склона имеет толщину около 200 м, а ее интенсивность непосредственно зависит от λ_c . Далее провели усреднение на уровне максимальных скоростей струи и получили величину V_b , которую будем называть **характерной скоростью струи**. Она объективно характеризует энергетику потока у склона, значит и энергетику возмущений при обтекании гор. Интенсивность боры в городе и бухте можно оценивать по величине энергии потока в этой зоне. Кривые на рисунке показывают, что характер изменений $V(300, x)$ одинаков по мере удаления от горы.



Энергетика боры

и, значит, величине V_b . Расчеты величины V_b и диапазона ее разброса dV были проведены для всех вариантов. Установлено, что величина dV не превышала 0.17 м/с.





Анализ различий между кривыми

наличие ложбины у рельефа много сильнее влияет на возмущения в средней тропосфере, чем у подветренного склона.

Энергетика боры

среднего рельефа вполне подходят для исследования боры;

8) достоверность выявленных зависимостей подтверждается малостью dV .

Можно считать, что закономерность сглаживания характеризует некий коэффициент увеличения характерной скорости под влиянием эффекта обтекания гор. Этот коэффициент увеличивается при уменьшении масштаба Лира: при $\lambda_c = 3$ его значение порядка 3, по мере увеличения λ_c его значения асимптотически приближаются к 1.

Значимые результаты

Впервые исследована зависимость орографических возмущений над горами в районе г. Новороссийска от изменений параметров натекающего потока в широком диапазоне.

Получено следующее:

1. При обтекании гор резонанс в тропосфере невозможен, поскольку волновая энергия возмущений от верхних слоев отражается лишь частично.
 2. Проблема устойчивости или «обрушения» роторов в природе требует специальных исследований.
 3. Скорость ветра в струе у подветренного склона в первом приближении линейно зависит от значения волнового масштаба в натекающем потоке, а во втором – от величины отражения волновой энергии от верхних слоев атмосферы.
 4. Сила ветра у поверхности земли после переваливания через горы увеличивается в несколько раз по сравнению с ветром в натекающем потоке в первую очередь благодаря высоте и крутизне подветренного склона и во вторую - вследствие турбулизации движений.
 5. Температура воздуха после переваливания через горы за счет адиабатического сжатия нагревается не более, чем на 1.5 градуса, так что катастрофическое понижение температуры при боре определяется не эффектом обтекания, а поступлением в рассматриваемой район более холодной воздушной массы.
-



Спасибо за внимание!
