

Моделирование орографических возмущений (Исследование адекватности аналитической модели по данным измерений облаков над горами Крыма)

В. Н. Кожевников*

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 02.07.2019; Подписана в печать 29.07.2019)

При использовании нелинейной аналитической модели обтекания гор исследовались орографические возмущения и адекватность модели. Теоретические расчеты траекторий движения, возмущений температуры и влажности сопоставлялись с данными стереофотограмметрических измерений волновых облаков. Показано, что модель успешно описывает пространственную структуру и амплитуды возмущений в тропосфере вне приземного турбулентного слоя. Установлено, что в дни наблюдения облаков турбулентные процессы в приземном слое мало влияли на волновые процессы на высотах выше 2.5 км.

PACS: 92.60.-e

УДК: 551.

Ключевые слова: физика атмосферы, облака, гидродинамика, моделирование, обтекание гор, масштаб Лира.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при исследовании явления обтекания гор широко используются методы теоретического моделирования. Все они опираются на решение системы известных уравнений гидротермодинамики. На первом этапе использовались исключительно аналитические методы моделирования. В последние годы бурно развиваются численные методы, использующие возрастающие возможности современной вычислительной техники. Аналитические модели учитывают не все известные физические факторы явления, но при этом добиваются точного их учета. Численные модели включают в расчет практически все факторы, но при этом используют ряд приближенных параметрических соотношений. Адекватность любого метода моделирования должна тщательно проверяться, - и в первую очередь путем прямых измерений в природе. Настоящая работа направлена на исследование адекватности нелинейной аналитической модели, достаточно давно используемой в наших исследованиях, в которой проблема сводится к решению уравнения Гельмгольца [1]:

$$\nabla^2 \psi' + \chi^2 \psi' = 0, \quad \psi' = \psi - \psi_0, \quad \psi_0 = -Uz, \quad (1)$$

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \chi = \frac{N}{U} = 2\pi\lambda_c^{-1}, \quad \lambda_c = 2\pi\frac{U}{N}, \quad (2)$$

$$N^2 = \frac{g}{\Theta} \frac{d\Theta}{dz} = g \frac{(\gamma_a - \gamma)}{T_1}, \quad \gamma = -\frac{dT}{dz} \quad (3)$$

где: ψ — функция тока, индексом 0 выделена функция тока в натекающем потоке, ψ' — возмущение функции

тока, U — скорость в натекающем потоке, Θ — потенциальная температура, γ, γ_a — вертикальный и сухоадиабатический градиенты температуры, g — ускорение силы тяжести, N — волновая частота Брента-Вяйсяля, T_1 — характерная температура, чертой сверху обозначаются значения в натекающем потоке. Сведение проблемы к (1–3) опирается на возможность рассмотрения двумерного, стационарного и среднемасштабного приближения. Эта возможность обоснована исследованиями многих ученых, — в том числе в нашей стране, таких, как И. А. Кибель, А. Ф. Дюбюк, Л. Н. Гутман и др. [1], за рубежом — таких, как Кене, Скорер и др. [2, 3]. Важнейшее преимущество (1–3) состоит в том, что при этом точно учитывается нелинейность поля скоростей. Это достигается за счет того, что рассматривается частный случай состояния натекающего потока, — когда в нем не зависят от высоты скорость и градиент температуры:

$$U = \text{Const}, \quad \gamma = \text{Const}. \quad (4)$$

Впервые подобное сведение исходных нелинейных уравнений к уравнению Гельмгольца было использовано Лонгом [4]. Это было сделано способом, более подходящим для исследований возмущений в воде, чем в атмосфере, поскольку упругость учитывается через градиент плотности. При этом решение было построено для варианта, когда течение ограничено сверху горизонтальной крышкой. Такой подход за рубежом называют «нелинейной моделью Лонга». Возмущения в таком случае разделяют на два режима — докритический и сверхкритический. При первом режиме возможен резонанс возмущений, когда волновая энергии возмущений полностью отражается от верхней границы [1]. В используемой в данной работе модели упругость среды учитывается согласно (2, 3) через градиент потенциальной температуры. В данном исследовании учитывается вертикальная неограниченность атмосферы и подобные резонансные эффекты отсутствуют. В модели действие сил Кориолиса опускается, и это означает,

*E-mail: kozhvn@mail.ru

что она может применяться только при рассмотрении среднemasштабных ситуаций. Использование предположения об адиабатичности требует, чтобы рассматривались быстрые процессы при условии небольшой влажности воздуха. Отсутствие учета сил вязкости и турбулентной вязкости означает, что модель должна использоваться в первую очередь для исследований вне приземного слоя.

Во всех подобных исследованиях атмосфера рассматривается не в рамках прежней классической гидродинамики однородной жидкости, а в рамках гидродинамики расслоенной жидкости. Это приводит к необходимости учитывать наличие у частиц воздуха силы плавуности. Она определяется тем, что при быстрых вертикальных смещениях любая частица изменяет свою температуру с сухоадиабатическим градиентом, тогда как в среде этот градиент другой. По этой причине атмосфера упруга по отношению к таким смещениям и, значит, возмущения в ней при обтекании гор должны иметь волновой характер. Мерой упругости является частота N . Поскольку натекающий поток обладает скоростью, у возмущений появляется характеристика, объединяющая оба указанных фактора. Этой характеристикой является волновой масштаб Лира λ_c [5], задаваемый соотношением (2). Решение строится для гор высотой порядка одного и горизонтальной протяженности 25 км. Возмущения температуры определяются по формуле:

$$T' = -(\gamma_a - \gamma) \frac{\psi'}{U} \quad (5)$$

Репрезентативность модели исследовалась на основе результатов измерения пространственного положения облаков над горами Крыма во время ежегодных летних экспедиций сотрудников и студентов кафедры физики атмосферы Московского университета. При этом рассматривались только волновые орографические облака A_c *lent*. В исследовании будут использованы результаты измерения характеристик облаков, наблюдавшихся над горами 8.09.1975 и 15.07.1976 и проанализированных ранее в [6, 7]. Результаты измерений в [6] сопоставлялись с результатами наших теоретических расчетов. Последние теперь следует считать предварительными, поскольку ранее не было возможности провести расчеты в полном объеме. К тому же тогда применялся однослойный вариант описанной модели, т.е. не учитывалась возможность отражения волновой энергии от верхних слоев атмосферы. Теперь используется трехслойный вариант модели [8, 9], в которой нижний слой представляет тропосферу толщиной 11 км, а два вышележащих слоя всю верхнюю атмосферу. Толщина среднего слоя задается равной 9 км. Значения скорости U одинаковы в слоях. Рассчитываются поля траекторий движения, возмущений температуры и относительной влажности $Fotn$. Форма рельефа определяется с карты высот путем специальной процедуры усреднения и учитывается с точностью до 30 м.

Судить о свойствах натекающего потока можно бы-

ло только по результатам радиозондирования в Севастополе и Симферополе. В предыдущем исследовании мы пытались свойства натекающего потока задавать, непосредственно опираясь на данные радиозондирования в день наблюдения облачности. Теперь решено было не связывать жестко модельные расчеты с данными зондирования, а сравнивать результаты измерений облаков с результатами целого набора вариантов расчета. Значения градиента γ задавались в двух вариантах: в однослойном, когда они были одинаковы во всех слоях, и в трехслойном, когда учитывалось отражение энергии от верхних слоев. В последнем случае в вышележащих слоях γ задавались равными 0 и 3 град/км.

Часть из полученных результатов моделирования иллюстрируется на рис. 1–6. Здесь представлены картины обтекания гор Крыма для шести вариантов. Обтекаемый рельеф закрашен, его максимальная высота, равная 1.125 км, имеет координату $x = 0$.

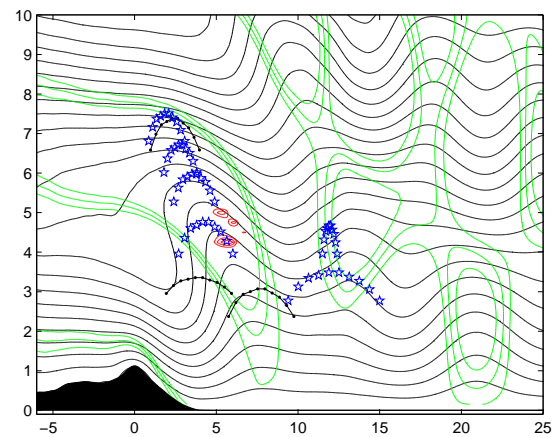


Рис. 1: Возмущения атмосферы при обтекании гор: траектории движения (сплошные черные линии), изолинии отрицательных T' (зеленые сплошные) изолинии $Fotn$ (красные сплошные). Вариант 111: $U=12$ м/с, $\lambda_c=6.25, 3.65, 4.23$ км, $\gamma=6, 0, 3$ град/км, $VT=[0.2 \ 0.7 \ 1.2]$, $Fotn=[1(0.2)1.4]$

Представляется часть расчетного пространства — по высоте до 10 км и для $-6 < x < 25$ км. Натекающий поток направлен слева направо. Траектории отождествляются значениями их высот в натекающем потоке z_0 . Изолинии возмущений температуры и относительной влажности характеризуются величинами VT (в градусах) и $Fotn$ (в долях от 100% относительной влажности). На рисунках траектории представляются для $z_0 = 0.5(0.5)10.5$ км. В подписях даются номер варианта счета, величина U , послойные значения λ_c и γ , диапазоны представления изолиний VT и $Fotn$. Рисунки приводятся в порядке уменьшения скорости U . Они дают полное представление об ожидаемом диапазоне возмущений. На рисунках также условно представлено положение 9 облаков дугами двух цветов. Для определенности будем облака нумеровать сверху

вниз. Наблюдавшиеся 8 сентября три облака (№ 1–3) представлены черными линиями с крестиками, 15 июля — шесть облаков (4–7 и 8, 9) — синими линиями со звездочками. Высота и ширина дуг характеризуют вертикальную толщину и ширину измеренных облаков.

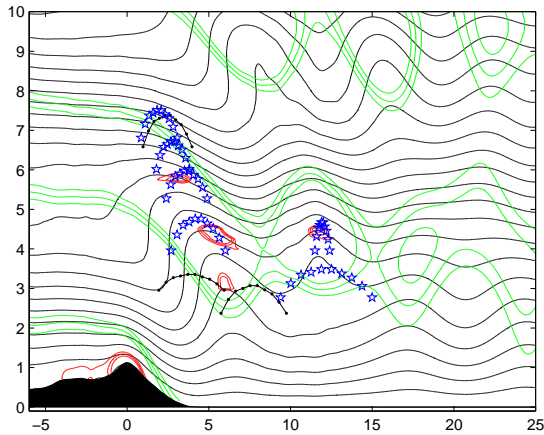


Рис. 2: Возмущения атмосферы при обтекании гор. Вариант 498: $U=10.5$, $\lambda_c=5.46$, 3.19, 3.7, $\gamma=6$, 0, 3, $VT=[0.2\ 0.7\ 1.2]$, $Fotn=[1(0.05)1.1]$

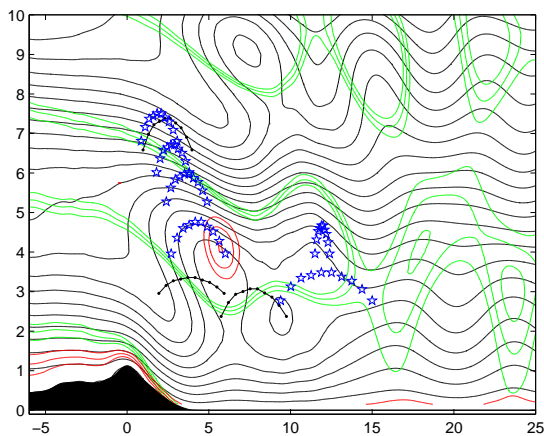


Рис. 3: Возмущения атмосферы при обтекании гор. Вариант 785: $U=10.48$, $\lambda_c=5.45$, 3.19, 3.69, $\gamma=6$, 0, 3, $VT=[0.2\ 0.7\ 1.2]$, $Fotn=[1\ 1.2\ 1.4]$

Вначале проанализируем характер орографических возмущений. Во всех случаях возмущения имеют волновой характер. Интенсивность возмущений сложным образом зависит от всех параметров задачи, а для конкретного рельефа в первую очередь от скорости и во вторую от градиента температуры в натекающем потоке. Подобные зависимости анализировались ранее на основании рассмотрения одного двух примеров. В данной работе было рассмотрено не менее 15 вариантов

расчета, и они позволили в определенной мере прояснить данную проблему. Оценивать зависимость интенсивности возмущений от параметров задачи весьма не просто по ряду причин. Во-первых, эта зависимость не линейна. Во-вторых, показатели возмущений заметно изменяются по пространству. В этой работе решено было использовать для этого максимальные отрицательные значения возмущений температуры. Кроме того, с этой целью было решено рассчитывать каждый раз значение безразмерной высоты горы ζ , определяемой обратной величиной внутреннего числа Фруда F_i , в котором в качестве масштаба используется максимальная высота горы h_m . Данное название предложил использовать Лин в [10]. Здесь полезно для этого применять соотношения:

$$\zeta = F_i^{-1} = \frac{N h_m}{U} = 2\pi \frac{h_m}{\lambda_c} \quad (6)$$

Этот параметр впервые был введен при моделировании обтекания горы-полукруга в [11–13], радиус которой совпадал с h_m . Здесь анализировались примеры расчета для значений $\zeta = 1, 2$ и 3. При этом в частности исследовалась проблема перехода возмущений к стадии роторного течения в понимании Лонга [4], т.е. течения, в котором хотя бы некоторые частицы двигаются вертикально или даже навстречу основному потоку. Практически одновременно с [13] была опубликована работа [14], в которой Майлс и Хуперт представили результаты аналогичного моделирования для значений $\zeta = 0.5, 1, 1.27$ и 1.5. В наших расчетах установлено, что переход к роторному течению должен происходить между значениями 1 и 2. В [14] было уточнено, что это должно происходить между значениями 1.27 и 1.5. Позже встал вопрос о том, насколько данные результаты остаются справедливыми для гор реальной формы. В рамках модели [15], опирающейся на те же соотношения (1–5), но рассматривающей обтекание гор реальной формы, было установлено, что в возмущениях проявляется не только масштаб Лира, но и масштаб формы рельефа. В частности, было показано, что для гор Крыма этот масштаб порядка 15–20 км.

Зависимость интенсивности возмущений от параметров задачи для вариантов, иллюстрируемых на рисунках, представлена в таблице. Значения масштаба Лира здесь приводятся в км, скорости — в м/с, градиента температуры в град/км, максимальные значения возмущений температуры — в градусах. Во всех случаях градиенты в верхних слоях были равны 0 и 3 град/км соответственно. На нижней строке буквами отмечают появление или отсутствие в потоке роторов, при этом буквой «р» отмечается появление роторов в начальной стадии развития и буквой «в» — в стадии появления замкнутых вихрей. Вопрос о параметре ζ в [15] не анализировался подробно. Данные, представленные в табл. 1, показывают, что значения параметра ζ могут служить критерием перехода к роторному режиму возмущений только приближенно. Действитель-

Таблица I: Зависимость интенсивности возмущений от параметров задачи

λ_c	6.24	5.46	5.45	5.20	5.05	4.97
U	12	10.50	10.48	10	9.9	9.75
γ_1	6	6	6	6	5.83	5.83
$\max(-T')$	5	3	7	3	9	8
Z	1.32	1.29	1.30	1.36	1,40	1.42
Роторы/вихри	р	б/р	в	б/р	В	в

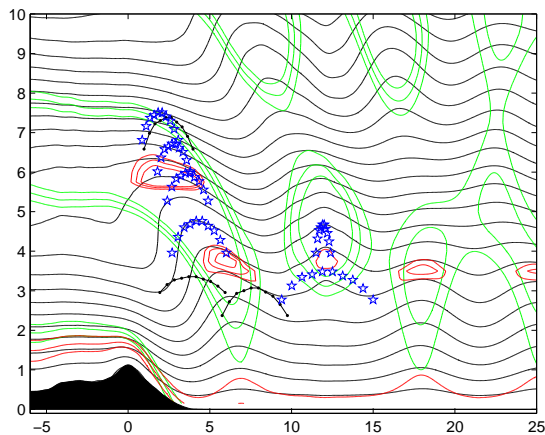


Рис. 4: Возмущения атмосферы при обтекании гор. Вариант 92: $U=10$, $\lambda_c=5.20, 3.04, 3.69, 3.53$, $\gamma=6, 0, 3$, $VT=[0.2 \ 0.7 \ 1.2]$, $Fotn=[1 \ 1.2 \ 1.4]$

но, видим: роторы отсутствуют над горами при значениях ζ равных 1.29 и 1.36 и присутствуют при $\zeta = 1.30$. Теперь понятно, что величину безразмерной высоты горы при анализе реальных ситуаций следует применять с осторожностью.

Приведенные данные подтверждают факт нелинейности изменений интенсивности возмущений при изменении параметров задачи. Особенно это бросается в глаза, если рассмотреть изменения возмущений, показанных нас рис. 2 и 3. На первом из них при скорости натекающего потока 10.5 м/с видим ротор в самой начальной стадии развития. На рис. 3 ротор уже полностью развит: в потоке имеется не только возвратное течение, но и ряд интенсивных вихрей. И все это только при уменьшении скорости U на 0.20 м/с.

Проведенные расчеты в этой работе также, как и во многих предыдущих (см., к примеру, [1, 10] (стр. 119, 127, 128, 153), [2] (стр. 300–304), [16] (т. 1, стр. 359–365)) показали, что в поле траекторий следует обращать внимание на то, что волны образуют специфические пространственные структуры. Рис. 1, например, в полной мере позволяет видеть это. Над подветренным склоном гор на высотах 1–5 км на большой площади расположены волновые ложбины. Ниже по потоку

на высотах 3–11 км расположены волновые гребни. В первой из этих областей частицы воздуха смещаются вниз по сравнению с их исходными высотами в натекающем потоке, во второй — вверх, и здесь T' отрицательны, что и подтверждается представленными изолиниями. По мере удаления от гор по любому направлению подобная тенденция периодически повторяется примерно с масштабом λ_c . Важно отметить, что фазовые линии волнового поля не совпадают с вертикалью, а по мере увеличении высоты их точки нелинейно смещаются навстречу основному потоку. Это показывает, что модель правильно описывает распространение волновой энергии от гор. Изолинии возмущений температуры позволяют по-новому отметить еще два свойства, ранее упоминаемые в [1]:

1. Амплитуды быстро уменьшаются по потоку.
2. С высотой они уменьшаются не монотонно, а на фоне почти гармонических колебаний с периодом порядка масштаба λ_c .

Области положительных смещений частиц воздуха, очевидно, являются благоприятными для появления в них облаков. Для удобства будем различать их по номеру следования по потоку и по высоте. Во всех рассмотренных вариантах отмеченные свойства возмущений в главном повторяются, однако одновременно проявляются и различия. Важно при этом отметить, что особенно резкие изменения происходят, когда степень развития роторов над горами достигает стадии появления развитых замкнутых вихрей, подобных тем, что показаны на рис. 3. На рис. 1, 2 и 4 замкнутые вихри отсутствуют и роторы развиты слабо.

Полагаем, что водяной пар переносится вдоль траекторий как пассивная примесь. Поэтому появления облаков следует ожидать только там, где пар за счет понижения температуры будет достигать состояния насыщения. С целью лучшего теоретического осмысления этого процесса были проведены расчеты полей $Fotn$ для ряда вариантов при задании профиля удельной влажности в натекающем потоке по формуле:

$$q = q_0 [1 + a \sin(d + bz)] \exp(-cz). \quad (7)$$

Экспонента в (7) обеспечивала основную тенденцию убывания влажности с высотой, гармоническая модуляция позволяла дополнительно изменять влажность

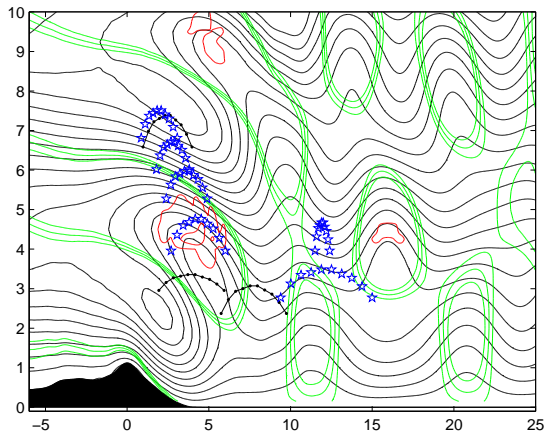


Рис. 5: Возмущения атмосферы при обтекании гор. Вариант 903: $U=9.9$, $\lambda_c=5.05, 3.02, 3.51$, $\gamma=6.87, 6.87, 6.87$, $VT=[0.2 \ 0.7 \ 1.2]$, $Fotn=[1 \ 6]$

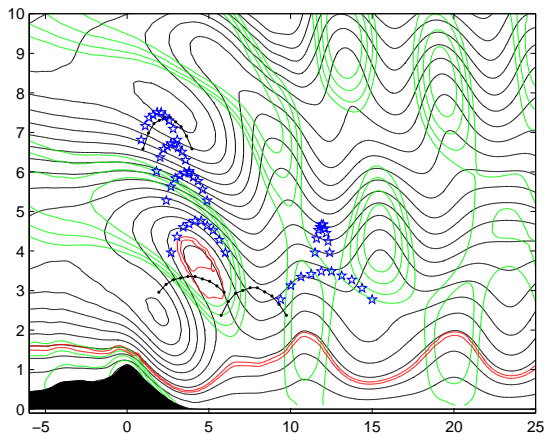


Рис. 6: Возмущения атмосферы при обтекании гор. Вариант 902: $U=9.75$, $\lambda_c=4.97, 2.98, 3.45$, $\gamma=5.83, 0, 3$, $VT=[0.2 \ 1 \ 2 \ 3]$, $Fotn=[1 \ 1.1]$

в отдельных слоях. Один пример теоретического задания профиля влажности для дней наблюдения облачности показан на рис.7 совместно с данными радиозондирования в Севастополе за два срока. С достаточной точностью теоретический профиль на нужных уровнях высоты воспроизводит данные зондирования. Полученные изолинии $Fotn$ представлены на рис. 1–6 красным цветом. Теоретически полученные многослойные облака представлены на рис. 1, 2, 4. Особенно важно было разобраться в том, за счет чего над горами появляются такие облака. Численные эксперименты привели к выводу, что в природе многослойные облака определяются не только профилем удельной влажности, но и резкими изменениями температуры в отдельных слоях. Расчеты также показали, что при соответствующем

задании влажности можно получить облака в любой точке областей отрицательных T' . В вариантах, иллюстрируемых на рисунках, влажность в натекающем потоке задавалась по-разному, и это приводило к разным картинам облачности. При этом неизменно облака попадали в соответствующие области положительных смещений частиц с исходных уровней высоты. На рис.2 показан наиболее яркий пример такого случая, когда теория предсказывает трехслойное облако в 1-й области положительных смещений и одно облако — во 2-й.

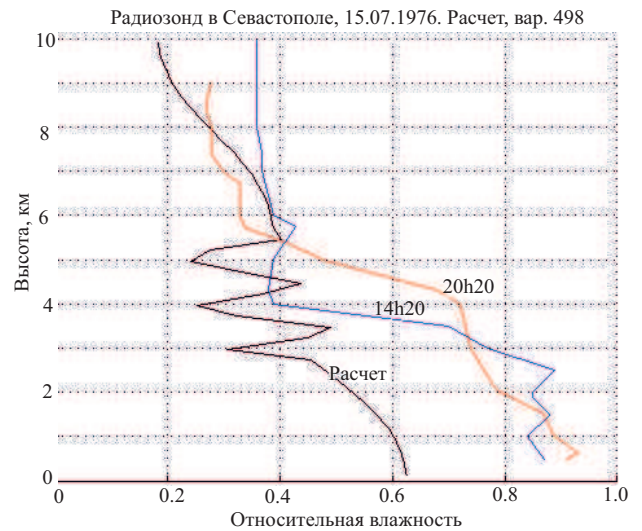


Рис. 7: Вертикальные профили относительной влажности — рассчитанный по (7) и измеренные с разрывом по времени в 6 часов (цветные)

Пространственные характеристики облаков определялись на основе стереофотограмметрического метода [6]. Точность определения характерной высоты облаков была около ± 200 м. Анализ привел к выводу, что в вертикальной проекции горизонтальное отстояние облаков от положения гребня гор определяется с погрешностью около 3 км. Анализируя пространственное положение облаков, следует понять, в какой мере оно согласуется с волновым характером возмущений, предсказываемым моделью.

Теперь можно провести конкретное сопоставление предсказываемой картины возмущений с результатами измерений облачности. Начнем с результатов наблюдения трех облаков 8 сентября, и в первую очередь с облаков 2 и 3. Очевидно, следует проанализировать, в каких вариантах они одновременно «высвечивают» 1-ю область положительных смещений. Строго говоря, на представленных рисунках идеально это не наблюдается. Однако, если учесть реальную точность определения координат этих облаков, то можно увидеть, что оба облака только в варианте 498 (рис. 2) почти одновременно попадают в область предсказаний теории. Согласно другим рисункам либо одно, либо другое облако выходит из 1-й области положительных смеще-

ний. Кроме того видим, что облако 3 формально на рисунках очень мало сдвинуто по потоку относительно облака 2, и, значит, попадает либо в 1-ю область положительных смещений, либо в промежуток между 1-й и 2-й областями. Чтобы лучше разобраться в этом, на рис. 8 представлена копия плановой проекции облаков из работы [6]. Здесь показаны контуры 4 наблюдавшихся облаков и одного рассчитанного теоретически (обозначен как «р»). Рассматриваемые облака 1–3 на рис. 8 представлены под номерами 2–4. Теперь можно видеть, что облако 3 следует связывать со 2-й положительной областью положительных смещений. Видимо, при переносе данных в вертикальную проекцию горизонтальные координаты этого облака были оценены неверно из-за того, что: 1 — облака 2, 3 имеют большую ширину, 2 — оси облаков заметно изменяли свои направления в пространстве. Если учесть эти соображения, то можно в варианте 498, на рис. 2, облако 3 сместить по горизонтали не только в пределах указанной выше погрешности в 3 км, но на 5–6 км. Тогда получим, что в варианте 498 все три облака 1–3 неплохо «высвечивают» положение предсказываемых первых двух областей $T' < 0$.

Теперь рассмотрим аналогичным образом облака, наблюдавшиеся 15 июля. Эти облака следует разделить на четыре группы. Первая группа из четырех облаков (№ 4–7) образует по существу единое многоярусное облако с общей вертикальной мощностью почти в 4 км. Все облака идеально попадают в первую область отрицательных значений T' в вариантах, представленных на рис. 1, 2, 4. В варианте 785 (рис. 3) облако 7 попадает в ту же область, если его сместить в пределах указанной точности определения его координат. В вариантах 903 и 902 (рис. 5 и 6) верхние облака этой группы либо частично либо полностью выходят за границы 1-й области отрицательных T' . Это означает, что все облака группы подтверждают предсказания теории идеально в варианте 498 (рис. 2), чуть хуже в варианте 111 (рис. 1) и неплохо — в варианте 92 (рис. 4).

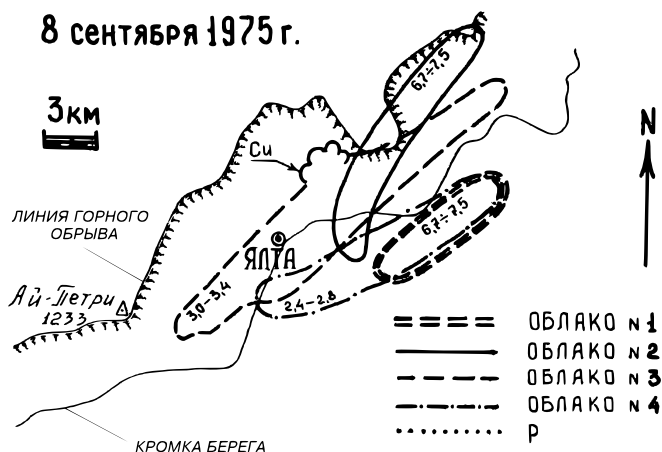


Рис. 8: Плановая проекция рельефа и облаков. Теоретическое облако «р» в проекции не представлено

Теперь остается выяснить, в каких вариантах такое согласие имеет место у остальных облаков. Вторую группу представляло облако 8 (высота около 4.5 км). Нетрудно видеть, что оно во всех вариантах, кроме показанных на рис. 5 и 6, идеально «высвечивает» область гребней волн во 2-й области положительных смещений. Под номером 9 согласно [7] представляются пять облаков — четыре с небольшой протяженностью по потоку и одно со средней протяженностью. Все они располагались практически в одну линию, вытянутую параллельно линии гор. В [7] была высказана гипотеза, что облако средних размеров состояло из двух, расположенных на разном удалении от гребня гор, так что их общая ширина по потоку была вдвое больше ширины остальных облаков. Подтвердить эту догадку не было возможности, поскольку промежуток между ними не просматривался с места фотографирования. В пользу этой гипотезы свидетельствует то, что облако 8, как нетрудно видеть, имеет более, чем вдвое меньшую ширину, чем общая ширина группы облаков под номером 9. Если считать, что облако средних размеров состояло из двух, то получается, что под номером 9 было шесть облаков. Их можно, например, распределить на 2 подгруппы: 1-я подгруппа состояла из 2 облаков, 2-я — из 4. Ширина каждого из них была примерно равной ширине облака 8. Облака 2-й подгруппы можно попробовать сдвигать по потоку примерно на 3 км. С учетом сказанного, анализ положения облаков под номером 9 дает следующий результат. 1-я подгруппа «высвечивает» только 2-ю область отрицательных T' . При этом идеально это выглядит только в варианте 903 (рис. 5), хорошо в вариантах 498, 785, 92 и 902 (соответственно на рис. 2, 3, 4, 6) и частично хорошо в варианте 111 (рис. 1). 2-я подгруппа, «высвечивает» как 2-ую, так и 3-ю области по потоку, но последнюю совсем не убедительно. Неопределенность, которую мы видим при анализе положения последних облаков, видимо, следует рассматривать как свидетельство того, что теория теряет свою репрезентативность для высот меньших 2.5 км. Без данных облаков получается, что облака, наблюдавшиеся 15 июля, почти идеально подтверждают данные расчетов для варианта 498 (рис. 2) и хорошо для варианта 111 (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги. Понятно, что исследование адекватности модели было проведено далеко не для всех возможных ситуаций в природе: использовались результаты измерений всего для двух дней, измерения проводились летом при условиях умеренной влажности воздуха, рассматривались горы конкретной формы и т.д. Установлено, что для широкого диапазона состояний атмосферы созданная аналитическая модель правильно предсказывает пространственную организацию волновых возмущений на высотах выше 2.5 км. Это проявляется в образовании обширных структур, в которых

волны имеют близкие фазы, а вертикальные смещения частиц воздуха близкие значения. Размеры структур и их периодичность по пространству явно коррелируют с масштабом Лира. Более того, случай с наблюдениями 15 июля позволил проанализировать, в какой мере модель может предсказывать амплитуды волн. Теоретически рассчитанные облака, как легко видеть, не только попали в 1-ю область положительных смещений, но и образовали такую же многоярусную структуру, какая наблюдалась фактически. При расчете положения этих облаков профиль влажности задавался, как сказано выше, по существу совпадающим с тем, который был определен при радиозондировании. Отсюда получается, что амплитуды волн моделью предсказаны с той точностью, с какой это возможно было сделать.

Наконец, следует вспомнить, что теория учитыва-

ет не все факторы рассматриваемого явления. Особенно важно заметить, что теория не учитывает наличие приземного турбулентного слоя. Это в определенной мере проявляется в том, что именно наиболее близкие к земле облака хуже согласуются с теорией. Сказанное позволяет предположить, что приземный турбулентный слой во многих случаях влияет главным образом на процессы непосредственно у земли, но при этом как бы приподнимает теоретическую нижнюю границу на несколько сотен метров. В свободной атмосфере, т.е. на высотах выше 2.5 км, возмущения определяются волновыми свойствами атмосферы. При этом изменения возмущений по горизонтали приземный слой, видимо, искажает мало. Исследование этого и других выводов следует продолжить.

-
- [1] *Кожевников В. Н.* Возмущения атмосферы при обтекании гор. М.: Научный мир, 1999.
- [2] *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. М.: Мир, 1976.
- [3] *Скорер Р.* Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980.
- [4] *Long R. R.* Some aspects of the flow of stratified fluids. III. Continuous density gradients. *Tellus*, 1955. **7**, N 3.
- [5] *Lyra G.* // *Z. Angew. Math. Und Mech.* 1943. **23**, N 1, P. 1.
- [6] *Кожевников В. Н., Бибилова Т. Н., Журба Е. В.* // Изв. АН СССР Физика атмосферы и океана. 1986. **22**, № 7. С. 682.
- [7] *Бибилова Т. Н., Журба Е. В., Кисельникова В. З., Кожевников В. Н.* Подветренные орографические возмущения в Крыму. Тр. ГМЦ СССР. **238**. С. 93. Л., 1981.
- [8] *Кожевников В. Н., Беданов М. К.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. **29**, № 6. С. 780.
- [9] *Кожевников В. Н., Беданов М. К.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. **34**, № 4. С. 546.
- [10] *Lin Y.-L.* Mesoscale Dynamics. Cambridge, University Press, 2007.
- [11] *Кожевников В. Н.* К одной нелинейной задаче об орографическом возмущении стратифицированного воздушного потока. Изв. АН СССР, сер. геофиз., No 7, стр. 1108-1116, 1963.
- [12] *Кожевников В. Н.* Орографические возмущения воздушного потока. Диссертация на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук. МГУ, физич. факультет, стр. 1 - metricconverterProductID223. М223. М., 1965.
- [13] *Кожевников В. Н.* // Изв. АН СССР. 1968. **4**, № 1. С. 33.
- [14] *Mailes J. W.* // *J. of fluid mech.* 1968. **33**, N 4.
- [15] *Кожевников В. Н., Лосев А. С.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1985. **23**, № 5. С. 43.
- [16] *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. **1, 2**. М.: Мир, 1986.

Orographic disturbance modeling (Study of analytical model adequacy on the basis of measurements of clouds above the Crimean Mountains)

V. N. Kozhevnikov

Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: kozhvn@mail.ru

While using the non-linear analytical model of the flow over the mountains, orographic disturbances and the model adequacy were studied. Theoretically calculated trajectories, disturbances of temperature and humidity were compared with the actual stereophotogrammetric measurements of wavy clouds. It was shown that the model successfully describes the spatial structure and amplitudes of disturbances in the troposphere beyond the turbulent surface air. It was established that, on the days of clouds observations, turbulent processes in the surface air did not have any significant impact on wavy processes at the heights over 2.5 km.

PACS: 92.60.-e.

Keywords: physics of the atmosphere, clouds, hydrodynamics, modeling, flow around mountains, Lira scale.

Received 02 July 2019.

Сведения об авторе

Кожевников Валентин Николаевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: kozhvn@mail.ru.