

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРИИ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ ОБЛАКОВ НАД ГОРАМИ КРЫМА 15 ИЮЛЯ 1976 ГОДА

В.Н.Кожевников, М.К.Беданоков

*Московский государственный университет, Москва
Майкопский государственный технологический институт, Майкоп*

Статья представляет результаты и анализ теоретических расчетов траекторий обтекания Крымского хребта в районе Ялты на основе решения трехслойной гидродинамической нелинейной модели для гор произвольного профиля.

Сравнение результатов трех- и однослойной моделей с результатами наблюдений в Крыму показало, что трехслойная модель отражает реальность точнее.

В работах [1,2] проведен опыт сопоставления данных наблюдения за орографическими возмущениями атмосферы над горами Крыма с результатами теоретического моделирования этого явления. В [1] использовалась пространственная линеаризованная модель, а в [2] показана возможность точного учета рельефа на основе двумерной однослойной стационарной нелинейной задачи, учитывающей рельеф с точностью до 30 м и использующей предположения, что скорость U и градиент температуры γ в невозмущенном натекающем потоке постоянны по высоте, а стратосфера пропускает вверх все возмущения беспрепятственно (вся атмосфера заменяется неограниченной по высоте тропосферой).

В данной работе натурные наблюдения за возмущениями атмосферы будут сопоставляться с теоретическими расчетами по разработанной трехслойной модели, описанной в [3].

Об орографических возмущениях мы судим по наблюдениям за облаками, причем главным образом типа Ac lent (см.[4], в данной работе часть описания методики проведения и анализа экспериментальных и натурных измерений повторяет изложенное в [2,5], часть дополняет и уточняет предыдущее). При этом изучались прежде всего те их характеристики, которые позволяли судить о возникновении воздушных движений в горном районе и с подветренной стороны гор. Существует достаточно подробный анализ наблюдений облаков в Крыму [6,7]. Экспериментальные измерения проводились с помощью стереофотограмметрического метода изучения облачности [8-11]. Наблюдения проводились летом 1976 г. с базиса длиной 988 м, расположенного в прибрежной зоне поселка Кацивели (в 15 км западнее г. Ялты) и позволяли получать стереоскопические пары снимков облаков. Камеральная обработка стереопар производилась на кафедре физики атмосферы физического факультета МГУ. Координаты облаков рассчитывались на ЭВМ БЭСМ-4. При привязке модели к реальным условиям мы исходили из того, что она не пригодна для описания гидродинамики приземного слоя и что воздушный поток на высотах больше 1 км обтекает некоторую "усредненную" гору, которая отличается от истинного рельефа из-за приземных циркуляций мелкого масштаба (масштаба отдельных ущелий, оврагов, холмов и т.д.). Для определения λ_c и U применялось осреднение данных радиозондирования атмосферы, получаемых в Симферополе. Проводилось осреднение послойно с учетом толщины слоя, исключаясь нижний приземный слой (до 1 км), а также тонкие слои, где значение γ либо было близким к γ_a , либо превышало его. Наиболее подходящими для рассмотрения здесь оказались результаты утреннего радиозондирования 15 июля 1976 г. в Симферополе. Среднее направление ветра в слое 1-7 км по данным радиозонда свидетельствует о достаточной перпендикулярности натекающего потока к горам в основной толще тропосферы. Относительная влажность, согласно радиозонду, была очень высокой и составляла: 90-100% в слое 0.5-2.0 км, 84% в слое 2.5-3.24 км, 43-45% в слое 4-7.3 км. В работе [2] было проведено сопоставление данных о влажности на 15 июля 1976 года, полученных в Севастополе и Симферополе. Утром эти данные расходились незначительно ($\pm 16\%$). Днем же расхождение было существенным и носило систематический характер: радиозонд Симферополя давал значения относительной влажности на всех уровнях меньшее, чем радиозонд Севастополя. При

в этом в слое 3-5 км расхождения составляли 26-39%, а на остальных уровнях 10%-22%. Поэтому остается неясным, чем определяются столь большие расхождения: пространственно - временной изменчивостью влажности или несовершенством аппаратуры радиозондирования или обеими причинами сразу. Однако сам факт расхождения свидетельствует, что о влажности на текущего потока мы можем судить недостаточно уверенно, что также подчеркивается в работах [1,2].

Результаты анализа данных радиозонда приведены в таблице 1. Здесь представлены следующие параметры: H_H и H_B - соответственно высота нижней и верхней границы подслоя; T_H и T_B - соответственно температуры на нижней и верхней границе подслоя; \bar{T} , \bar{v} , $\bar{\gamma}$, $\bar{\lambda}_c$ - средние значения температуры, скорости, градиента и характерной длины волны в конкретном подслое. Данные таблицы 1 проиллюстрированы графиками на рис.1. Изменения скорости с высотой представлены в левой части рисунка. Здесь видно, что атмосферу можно разделить на три слоя различной устойчивости. Эти слои по устойчивости можно характеризовать средними градиентами: $\bar{\gamma}_1 = 5.65 \text{ К/км}$, $\bar{\gamma}_2 = 4.8 \text{ К/км}$, $\bar{\gamma}_3 = 7.10 \text{ К/км}$, или исходя из средних значений скорости и температуры в слое толщиной 7.3 км, равных 12.3 м/с и $T_1 = 268.7 \text{ К}$ соответственно, средними значениями характерной длины волны $\bar{\lambda}_c$: 6.20, 5.60, 7.7 км. Высота и толщина среднего наиболее устойчивого слоя определялась параметрами $H_1 = 3.25 \text{ км}$, $H_2 = 4.75 \text{ км}$.

15 июля 1976 г. облака типа Ac lent возникли очень рано, возможно, они существовали и ночью. Первое их фотографирование было сделано в 6 ч 54 мин. Просуществовали они до 10 часов 3 мин. Представление о внешнем виде облаков дает фотография, приведенная на рис.2а. Характеристики анализируемых облаков иллюстрируются также на рис.2б,3. На первом из них приводится плановая проекция облаков совместно с некоторыми подробностями расположения гор, кромки берега и т.д. На рис.3 даны результаты расчета траекторий и схематическое изображение облаков в вертикальном сечении (x,z) (подробности получения таких проекций см. [2,5]). Траектории движения представлены совершенно аналогично тому, как это делалось в [3]. Данные о параметрах модели приведены в подписях к рисунку.

Условно разделим все облака на три яруса. К верхнему ярусу облачности отнесем полосы облаков, расположенных практически друг над другом на высотах 7.3, 6.4 и 5.4 км. Они представлены на рис.3 под номерами 1, 2, 3. Верхнее и нижнее из них вдоль оси примерно параллельной линии гор имели протяженность около 10 км. Далее эту величину будем называть длиной облаков. Шириной облаков будем называть их размеры вдоль оси, направленной по ветру. У облаков 1,3 эта ширина составляла 2.5 км. Среднее облако 2 имело протяженность и ширину, равные 5.5 и 2 км соответственно. Вертикальная толщина данных облаков была почти одинаковой - около 0.7 км. Они мало изменяли свои размеры и положение во времени, т.е. практически были стационарными. При сопоставлении этих облаков с теоретическими расчетами видим, что облака 1,2 попадают точно в область главного гребня траекторий движения, т.е. в область максимальных положительных смещений относительно исходного уровня в натекающем потоке. Очевидно, что здесь адиабатическое охлаждение движущихся частиц воздуха наибольшее, следовательно, здесь при достаточной влажности по теории в первую очередь должны возникать волновые орографические облака. Облако 3 чуть сдвинуто в наветренную часть от положения оси того же гребня, а его нижняя часть почти соприкасается с верхней частью замкнутого ротора. Несмотря на это, общее качественное согласие данных наблюдений данным теории следует считать почти идеальным.

К облакам среднего яруса были отнесены три облака. На рис.3 это 4, 5, 6. Облако 4 располагалось на высоте 4.4 км прямо под облаками 1-3. Оно существовало столько времени, сколько верхние облака, но довольно заметно менялось в размерах. К 8 ч 04 мин облако 4 достигло максимальных размеров. Его ширина в это время составляла 3 - 7 км, толщина 0.8 км, а протяженность столь значительна, что ее не удалось измерить инструментально, во всяком случае она была не менее 36 км.

Вниз по потоку от облака 4 в течение всего времени наблюдений в полосе пространства шириной 3 - 10 км, вытянутой примерно параллельно линии гор, облака отсутствовали в среднем ярусе (см. рис.2б). Ниже по потоку в среднем ярусе располагались две полосы облаков, представленных на рис.2б, 3 под номерами 5 и 6. Они были менее стационарны, чем все выше рассмотренные - время существования каждого из них на превышало 10 минут. Облако 6 располагалось при этом в слое 2.8 - 3.5 км, а облако 5 - в слое 4 - 4.5 км. Не исключено, что облако 5 было двойным, т.е. состояло из двух незначительно отстоящих друг от друга горизонтов.

зонтали облаков. Это в определенной мере ощущается при рассмотрении плановой проекции рис.2б.

Сопоставление облачности среднего яруса с данными теории начнем с облака 4. Оно находится на линиях тока, проходящих между роторами, и огибающих второй ротор сверху, либо в зоне восходящих движений перед и частично в роторе (см. рис.3). Это качественно противоречит характеру Ac lent [4], согласно которому эти облака могут располагаться только в гребнях, где возмущения температуры отрицательны и максимальны. Скорее это облако можно отнести к системе движений, подобных тем, что имеются в области расположения облаков 2,3. Можно сделать вывод, что эта часть роторной зоны теорией искажается.

Облака 5,6 как видно из рис.2б (план сверху) располагались на линии, параллельной горам. Их форма, хотя и не столь четко, как у облаков верхнего яруса, показывает, что они скорее связаны с волновыми орографическими возмущениями, чем с конвекцией. Поэтому эти облака можно рассматривать как проявление второй волны орографического возмущения. Данные рис.3 свидетельствуют, что облако 5, в отличие от 6 плохо укладывается в систему рассчитанных траекторий движения. Легко видеть, что облако 5 пронизывают линии тока с $Z_0 = 3.8 - 4.5$ км, которые огибают второй ротор сверху. На этих же линиях тока над ротором лежит облако 3. Отсутствие облачности вдоль этих линий тока между облаками 5 и 6 свидетельствует, что либо эти облака лежат на разных траекториях, либо соединяющая их линия тока на рассматриваемом отрезке имеет заметно более глубокое смещение вниз, чем это показано на рис.3. В противном случае облака 3 и 5 должны представлять из себя одно большое облако, протянувшееся от гребней линий тока с $Z_0 = 3.5 - 4$ км в подветренную часть. А это противоречит экспериментальным наблюдениям. Гипотеза одна. Характер волновых движений здесь подобен форме траекторий, проходящих через облако 6, т.е. это траектории линий тока, которые огибают роторную зону снизу, а далее идут достаточно высоко и имеют достаточные положительные смещения. Облако 6 находится в гребнях траекторий линий тока с $Z_0 = 2.5 - 3$ км, таким образом оно качественно почти идеально согласуется с теорией. Несоответствие лишь в том, что оно двойное, а схема наблюдений это допускает. При этом получаем, что длина волн здесь, рассчитанных по теории, совпадает с результатами наблюдений. В то же время анализ взаимного расположения облаков 5 и 6 по вертикали показывает, что расстояние между ними около 1 км (отсчет ведется от центра облака). Следуя гипотезе, предложенной в [2], мы должны найти траекторию линии тока, которая обходит роторы снизу. Такие траектории в области вниз по потоку от роторной зоны были найдены (см. рис.3). Анализ показал, что здесь диапазон высот Z_0 линий тока, к которым можно отнести облака 5 и 6 равен $\Delta Z_0 = 500$ м, точнее от 2.5 км до ≈ 3.0 км. Если бы данная система линий тока была приподнята на 500 м или система облаков 5 и 6 была на столько же опущена, тогда облако 5 тоже было бы предсказано теорией. Однако в данной ситуации такое утверждение верно только для облака 6. Вероятно, что система траекторий линий тока в области вниз по потоку от роторной зоны оказалась прижатой вниз из-за использования приближения о несжимаемости атмосферы. Тем не менее поиск возможного расширения диапазона ΔZ_0 привел нас к следующему: анализ графика на рис.1 (результатов радиозонда) позволяет без существенных искажений данных наблюдений приподнять нижнюю границу среднего слоя и положить $H_1 = 3.5$ км. С учетом этого все входные параметры для модели должны измениться. Пересчет показывает, что они примут значения: $U = 12.3$ м/с; $\bar{T} = 268.7$ К; $\lambda_1 = 6.1$ км; $\lambda_2 = 5.8$ км; $\lambda_3 = 7.7$ км (или $\gamma_1 = 5.46$ К/км, $\gamma_2 = 5.15$ К/км, $\gamma_3 = 7.1$ К/км); $H_1 = 3.5$ км; $H_2 = 4.75$ км. В результате проведенных расчетов и их анализа (см. рис.4) можно сделать вывод, что диапазон Δ стал равен 750 м. Таким образом, модель позволила выявить возможность предсказания облаков 5, но не точно. Но скорее лучше не модернизировать нашу модель, а кардинально ее изменить - вводя расслоение по скорости, полнее учитывая сжимаемость, приземный слой и т.д. и т.п.

Облака приземного яруса состояли из Cu humiffr [4]. Они появились около 10 часов утра в первую очередь над заметными вершинами гор и теми их склонами, ориентация которых относительно утреннего солнца благоприятствовала процессу конвекции. Все облака данного яруса, очевидно, определялись конвекцией приземного слоя. Используемая здесь теоретическая модель не подходит для описания конвективных процессов и поэтому эти облака не со-поставлялись с результатами расчетов.

Таким образом, в данном исследовании, с одной стороны, показано, что результаты теории достаточно хорошо согласуются с облаками верхнего яруса 1-3, а также частью облаков сред-

него яруса 4 и 6. С другой стороны не согласуется с облаками 5. Анализ сопоставления результатов теории с данными наблюдений позволяет утверждать, что впервые теория достаточно хорошо предсказывает амплитуды возмущений и фазы волн над главным хребтом горы и в верхней части ее подветренного склона на высотах 5 - 8 км; в подветренной зоне в области удаления от вершины на 10 - 20 км на высотах 2.4 - 3.3 км. Важно также, что исследования подтверждают возможность существования в поле возмущений над горами Крыма роторных образований, достаточно стабильных во времени и протяженных в пространстве. Теория, видимо, преувеличивает и искаивает величину роторной зоны. Для улучшения теории прогнозирования облаков 5 вероятно, в модели необходимо учитывать сдвиг скорости ветра с высотой и сжимаемость в комплексе со скачкообразным изменением устойчивости по высоте. Сравнивая возможности однослоиной и трехслойной моделей, можно утверждать, что облака среднего яруса более полно и точно предсказывает трехслойная модель [3].

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ, Проект 93-05-8291) "Астрофизика и геофизическая гидродинамика".

Л и т е р а т у р а .

1. Бибикова Т.Н., Журба Е.В., Кисельникова В.З., Кожевников В.Н. Подветренные орографические возмущения в Крыму. // Тр. ГМЦ, 1981, вып.238, с.93-111.
2. Кожевников В.Н., Бибикова Т.Н., Журба Е.В. Орографические волны, облака и роторы с горизонтальной осью над горами Крыма. // Изв. АН СССР. ФАО. 1986. Т.22. N 7. С.682-690.
3. Кожевников В.Н., Беданоков М.К. Нелинейная многослойная модель обтекания гор произвольного профиля. Изв. РАН ФАО, 1993 т. 29, N 6 с.780-792.
4. Атлас облаков. /под ред. Хргиана А.Х., Новожилова И.И./, Гидрометеоиздат, Л., 1978, 267 с.
5. Кожевников В.Н., Бибикова Т.Н., Журба Е.В. Орографические возмущения атмосферы над Северным Уралом. - Изв. АН СССР, ФАО, 1977, т.13, N 5 ,с.451-460.
6. Дюбюк А.Ф., Бибикова Т.Н., Трубников Б.Н. О влиянии горной топографии и моря на формирование летней облачности над Южным Крымом. Тр. Укр. НИГМИ. 1961, вып.26.
7. Бибикова Т.Н., Дюбюк А.Ф., Трубников Б.Н. Условия образования высоко-кучевых чечевицеобразных облаков в районе Крыма. Тр. ЦАО, 1983, вып.47.
8. Блохин Н.А. Стереофотограмметрическая наземная съёмка. ОНТИ, М.-Л., 1937г., с.
9. Кондратьев Н.Н. О методе и некоторых результатах базисной фотограмметрической съёмки облаков. Тр. ЦАО, 1959, вып.30.
10. Хргиан А.Х. К вопросу о фотографировании облаков и одновременной съёмке всего небесного свода. Тр. ЦАО, 1960, вып.35.
11. Бибикова Т.Н. Опыт наблюдения облаков фотографическим методом с помощью сферического зеркала. Вестник МГУ, 1960, N 2.

Comparison of theoretical results with clouds observation data obtained in the Crimea mountains on the 15th of July 1976

V.N. Kozhevnikov, M.K.Bedanokov

The article presents the results and the analysis of the theoretical calculations of the trajectory of the flour over Crimean range in Jalta area on basis of the solution of the three-layer hydrodynamic nonlinear model for the mountains of arbitrary shape.

The comparison of the results of the three- and one-layer models with the results of the observations in Crimea proved that the three-layer model reflects the reality more precisely.

Таблица 1

Результаты анализа радиозонда ситуации в Крыму 15 июля 1976 года (7 часов 42 минуты).
 $T(0^\circ \text{C}) = 273.15^\circ \text{K}$, $\gamma_a = 9.862^\circ \text{K/km}$.

H_H (км)	H_B (км)	ΔH (км)	T_H (°C)	T_B (°C)	\bar{T} (°K)	\bar{V} (м/с)	γ (°K/km)	$\gamma_a - \gamma$ (°K/km)	λ_c (км)
1.28	1.46	0.18	8.4	7.4	281.05	11.5	5.56	4.300	6.2
1.46	1.50	0.04	7.4	7.2	280.45	12.0	5.00	4.862	5.9
1.50	1.60	0.10	7.2	6.6	280.05	11.5	6.00	3.862	6.6
1.60	2.00	0.40	6.6	4.5	278.70	12.5	5.25	4.612	6.0
2.00	2.50	0.50	4.5	2.0	276.40	13.5	5.00	4.862	5.9
2.50	3.00	0.50	2.0	-0.7	273.80	13.5	5.40	4.462	6.1
3.00	3.04	0.04	-0.7	-1.0	272.30	14.0	7.50	2.362	8.4
3.04	3.24	0.20	-1.0	-2.1	271.60	13.5	5.50	4.362	6.2
3.24	4.00	0.76	-2.1	-5.1	269.55	12.0	4.00	5.862	5.26
4.00	4.24	0.24	-5.1	-5.9	267.65	11.0	3.33	6.532	4.98
4.24	5.00	0.76	-5.9	-11.2	264.60	11.5	6.97	2.892	7.49
5.00	5.66	0.66	-11.2	-16.0	259.55	12.0	7.27	2.592	7.71
5.66	6.00	0.34	-16.0	-18.3	256.00	12.0	6.76	3.102	7.1
6.00	7.00	1.00	-18.3	-25.0	251.50	12.0	6.70	3.162	6.98
7.00	7.30	0.30	-25.0	-27.3	247.00	12.0	7.67	2.192	8.4

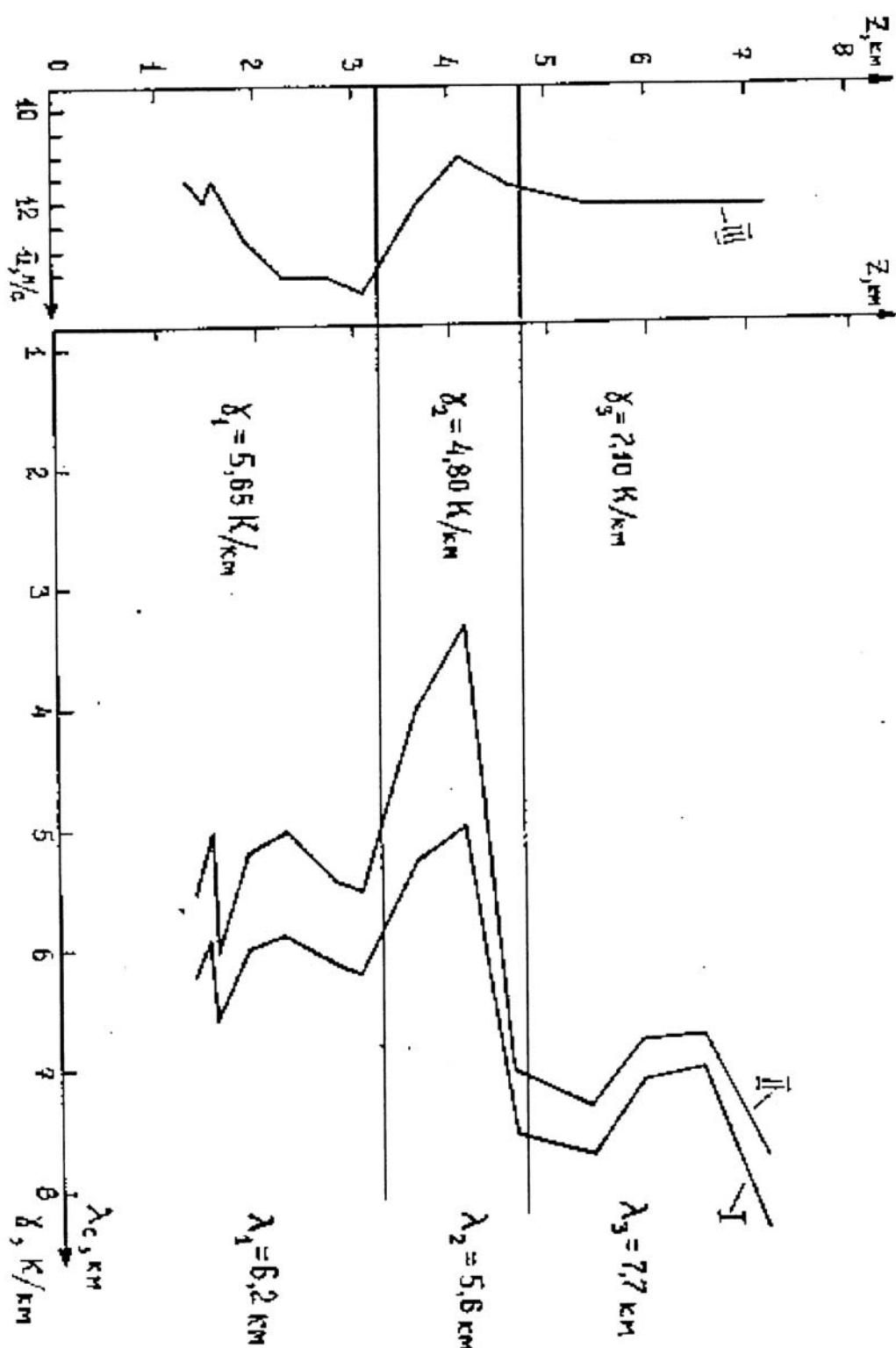


Рисунок 1

Графики функций по результатам радиозондирования:

- 1) $\lambda_c(z)$ - зависимость характерной длины волн от высоты;
- 2) $\gamma(z)$ - зависимость градиента температуры от высоты;
- 3) $\bar{u}(z)$ - изменение скорости с высотой.



б)

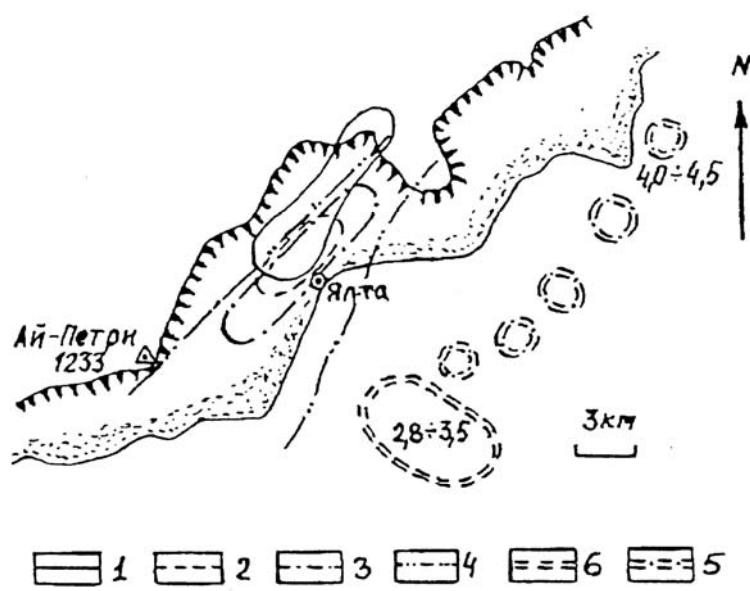


Рисунок 2

- а) Волновые орографические облака, наблюдавшиеся в Крыму 15 июля 1976 г.
 б) Плановое положение облаков 15 июля 1976 г.

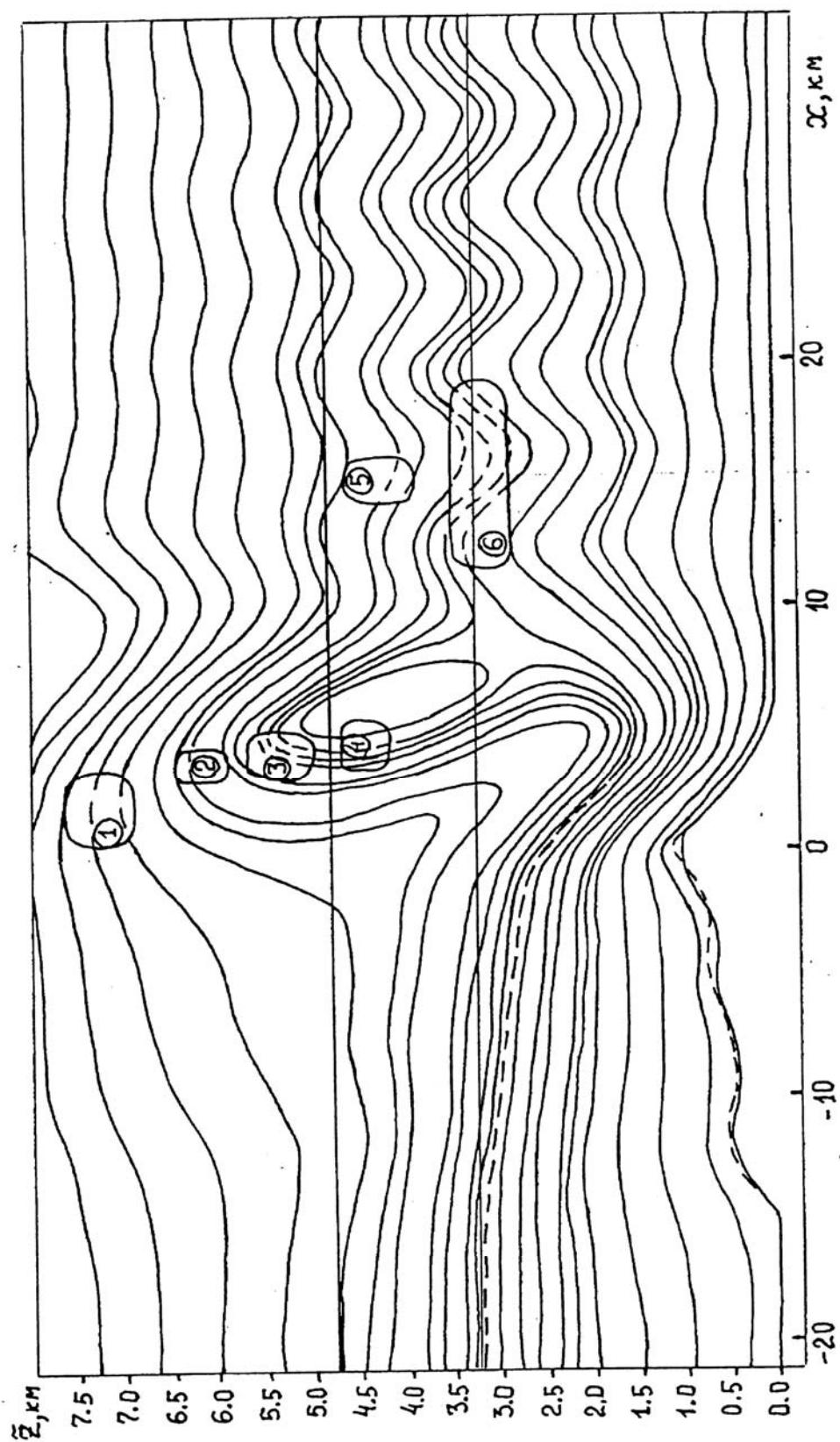


Рисунок 3

Сопоставление теоретической картины обтекания Крыма с натурными наблюдениями 15 июля 1976 г. (Пунктиром гора). Горизонтальными прямыми отмечен устойчивый слой: $H_1 = 3.25$, $H_2 = 4.75$ км. Значения исходных уровней траекторий снизу вверх: 0.0; 0.25; 0.75; 1.25; 1.75; 2.0; 2.25; 2.5; 2.7; 3.0; 3.2 (пунктиром); 3.35; 3.5; 3.8; 4.0; 4.5; 4.7; 5.0; 5.5; 6.0; 6.5; 7.0 км.

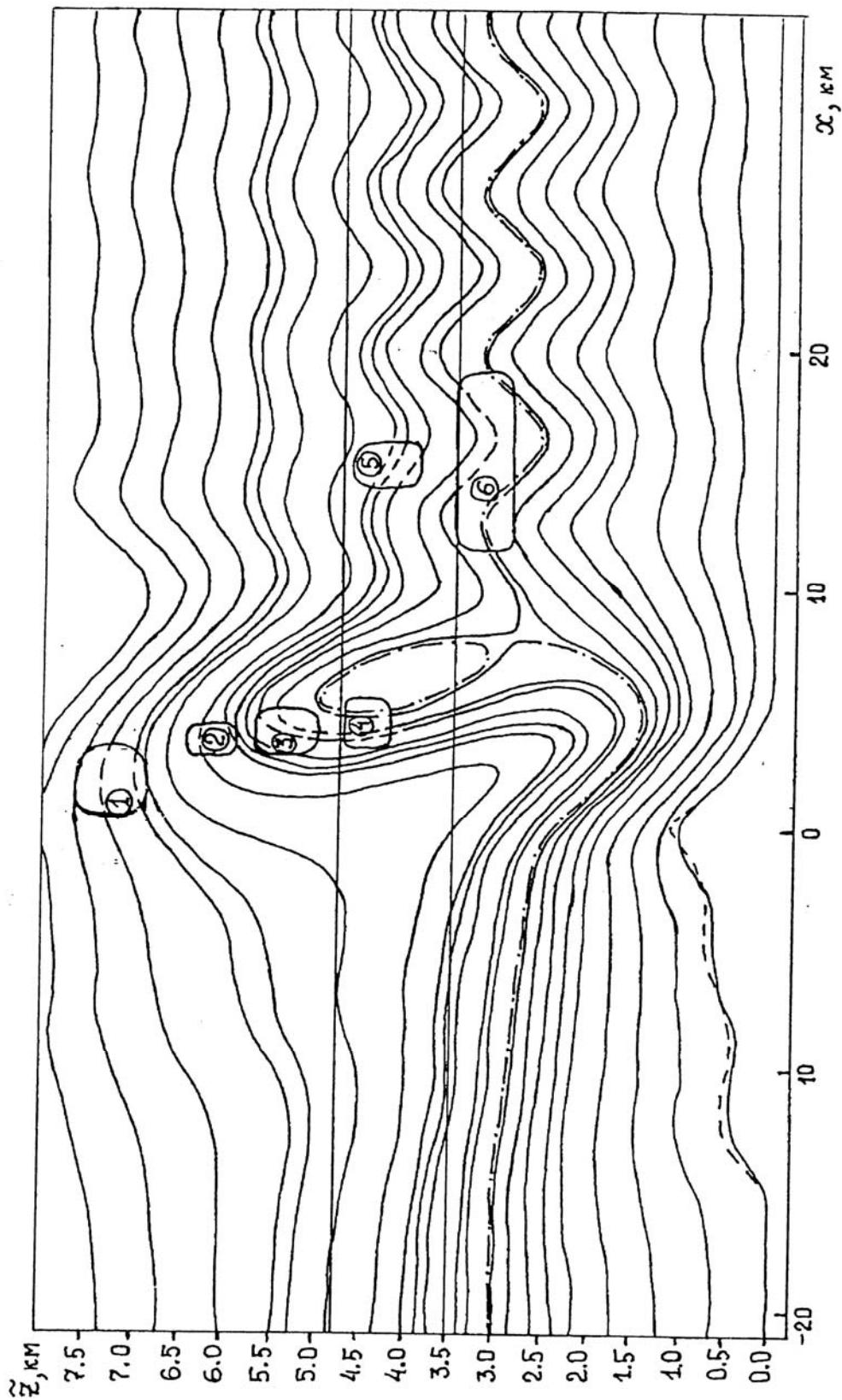


Рисунок 4

Сопоставление теоретической картины обтекания Крыма с натурными 15 июля 1976 г. (Пунктиром гора). Горизонтальными прямыми отмечен устойчивый слой: $H_1 = 3.5$, $H_2 = 4.75$ км. Значения исходных уровней траекторий снизу вверх: 0.0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.2; 2.5; 2.75; 3.0; 3.05 (пунктиром); 3.35; 3.5; 3.85; 4.15; 4.25; 4.5; 5.0; 5.35; 5.5; 6.0; 6.5; 7.5 км.