

Пример использования методики анализа фотографий волнового облака над горами Крыма

В.Н. Кожевников*

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

(Поступила в редакцию 31.05.2022; подписана в печать 02.08.2022)

Представляется методика визуального анализа фотографий волнового многоярусного облака. Показывается, что облако расположено в гребне орографических волн над главными хребтами гор Крыма. Показывается, что пространственные характеристики облака соответствуют результатам расчетов по ранее созданной нелинейной модели обтекания гор.

PACS: 93.90.+y

УДК: 551.515.6

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

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре физики атмосферы Московского университета уже многие десятилетия ведутся работы по изучению физики среднемасштабных атмосферных процессов, в том числе конкретно процессов в горных районах Крыма. Исследования проводятся комплексно в тесном сопоставлении как экспедиционных наблюдений и измерений в природе, так и теоретических модельных расчетов [1–13]. В настоящей публикации решено изложить суть одной из методик анализа, полученных в результате проведенных исследований, а именно методики визуальных наблюдений облачности (недавний опыт изложения этой методики был опубликован в [13]). Для этой цели используем серию из 11 фотографий огромного многоярусного волнового облака, которую недавно любезно нам предоставил для анализа и публикации московский астроном, педагог и фотограф В. А. Ромейко. Волновые облака привлекают особое внимание обычных наблюдателей своей красотой и необычностью, однако комментарии по этому поводу даются совершенно не компетентные.

Особый интерес вызывают фотографии многоярусных облаков. Такие случаи наблюдений редки и инструментальные измерения при этом практически не проводятся. Указанные фотографии были сделаны вечером 24 марта 2011 г. в течение одного часа (с 17 час. 49 мин). Шесть первых фотографий получены еще при нормальном освещении и пять — в красных лучах заходящего солнца. Координаты положения наблюдателя и время фотографирования было известно для двух случаев достаточно точно и для остальных — приблизительно. Одно из данных фото представлено ниже. Оно было получено из точки на Ангарском перевале и позволяет рассмотреть северную сторону облака. Пространственное положение облака легче представить, если воспользоваться картой изогипс высот

гор Крыма, показанных на рис. 2. На карте можно видеть основную часть горной территории — для диапазона широт в 60 и долгот — более 70 км. Значения соответствующих высот, перечислены в верхней части рисунка в метрах. Усредненное положение главных вершин гор показано красным пунктиром, а перпендикулярное к нему предполагаемое направление натекающего потока — сплошной красной прямой. Карта показывает, что от Ялты до Алушты широкая полоса высоких гор имеет высоту не менее 1.2 км. Примечательно, что данная полоса на западе заметно сужается и даже частично разрывается. На фотографии основной массив гор виден ниже облака в центре кадра. Левая часть этих гор — массив Бабуган–Яйла, правый край расположен над районом г. Ялта (или еще западнее). Отсюда, используя данные, представленные на рис. 2, можно сделать вывод, что рассматриваемое облако имеет горизонтальную протяженность того же порядка, что и протяженность гор, т.е. около 30 км. В самом низу и слева на фотографии можно видеть море. От наблюдателя оно расположено почти строго на юге.



Рис. 1. Фотография облаков, сделанная с северной стороны гор в период 18 ч. 52–56 мин. (координаты точки съемки 44°49'7.91" сш, 34°20'22.90" вд)

* kozhvn@mail.ru

Синей пунктирной линией на рис. 2 представлено направление, с которого было произведено фотографирование рассматриваемого облака. Звездочкой отмечена точка фотографирования. Синяя линия одновременно показывает направление на господствующие здесь вершины гор массива Бабуган–Яйла. Западнее точки фотографирования расположен еще один отдельно стоящий массив высоких гор — Чатыр–Даг. Восточный склон данного массива частично проглядывает на фото.

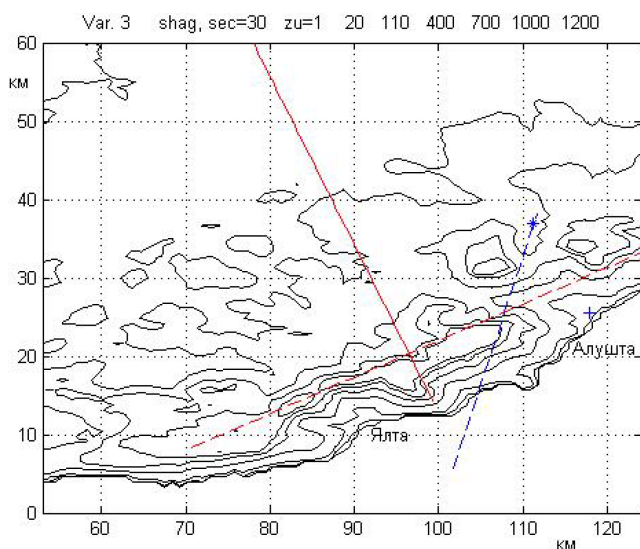


Рис. 2. Карта высот южного Крыма

Опыт анализа, наблюдений и стереофотограмметрических измерений подобных облаков [1–13] позволяет утверждать, что рассматриваемое облако было волновым, т.е. оно существовало в гребне волновых возмущений, порожденных взаимодействием с горными хребтами воздушного потока атмосферы с севера. Облако визуализирует ту часть пространства, где водяной пар, переносимый движущимися частицами воздуха в результате процесса конденсации, становится видимым. Это происходит так. Частицы воздуха в гребнях волн при смещении вверх уменьшают свою температуру практически адиабатически. Уменьшение температуры сопровождается уменьшением относительной влажности и в итоге приводит к конденсации водяного пара. На входе частиц воздуха в облако с наветренной стороны процесс конденсации дает однородный спектр размеров капель воды. При пролете частиц в облаке спектр размера капель становится неоднородным. На выходе из облака частицы воздуха опускаются, температура в них растет и это сопровождается процессом испарения капель воды. В результате этих процессов у волновых облаков наветренная граница типично гладкая, а подветренная — неровная, она часто напоминает бахрому, иногда — струи. Впрочем, данные различия заметны достаточно редко и главным образом у облаков на небольших высотах (высотах с большой

влажностью). Фото на рис. 1 не позволяет утверждать, что перед нами наветренная сторона облака, поскольку другая сторона плохо различима. Однако на некоторых других фотографиях указанное различие в гладкости границ усмотреть удастся.

Другим (и основным) признаком волновой природы облака является то, что оно практически стационарно: положение в пространстве и форма облака не изменяется в течение более часа (это будет еще очевиднее при рассмотрении остальных фотографий). Итак, можно полагать, что в рассматриваемом случае возмущения имели волновой и стационарный характер.

Представленная фотография позволяет считать, что облако имеет многослойное строение. Следует также обратить внимание на то, что границы отдельных слоев облака можно отождествлять с прямыми линиями и что эти прямые расходятся некоторым веером из одной бесконечно удаленной от нас точки справа. Далее замечаем, что линию положения главных горных вершин также можно отождествлять с некоей прямой. Учитывая законы перспективы, делаем вывод, что все указанные прямые в пространстве примерно параллельны друг другу. Значит, рассматриваемое облако вытянуто приблизительно параллельно горам. Наконец, замечаем, что форма облака вдоль его длины изменяется относительно немного, причем главным образом в его дальней юго-западной части. Следовательно, облако свидетельствует, что в значительной части пространства длительное время характер возмущений над горами был близок к двумерному случаю. Иными словами, наблюдение свидетельствует, что в атмосфере длительное время имело место стационарное двумерное волновое обтекание гор.

Нижняя поверхность облака затенена. Из параллельности прямых, соответствующих нижней и верхней северным границам, следует, что общая толщина нашего облака мало изменяется вдоль гор. Из параллельности прямых, соответствующих передней и задней границам нижней поверхности облака, следует, что отдельные облачные слои в горизонтальной проекции имеют вид полос почти постоянной ширины.

Первые фотографии в серии были сделаны в городе Алушта. На рис. 3 представлена вторая из них (17 час 50 мин; $44^{\circ}40'30.2$ сш, $34^{\circ}24'0.01''$ вд). Точка фотографирования данного облака на рис. 2 представлена крестиком. Как легко видеть, она расположена к югу от линии гор в прибрежной зоне. Согласно справочным данным, в этот момент съемки азимут солнца равнялся 260.4 , а угол высоты — $+11.3^{\circ}$. Как видим, облако на фото предстает в обычных цветах и состоит из нескольких слоев, вытянутых от наблюдателя. Фотографии, полученные позже, позволили узнать, что облако частично располагалось непосредственно над наблюдателем и простиралось не только на запад, но и частично на восток. Позже, в сентябре 2021 г. по нашей просьбе П. А. Данин произвел определение азимута направления из точки фотографирования на вершину холма, который виден в нижней части цен-

тра кадра между левой границей крыши автовокзала в Алуште и жилой башней вдаль. Азимут этого направления оказался равным $240^{\circ} 45'$. Карта на рис. 2 позволяет определить, что направление главных горных хребтов составляет 245° . Тем самым получается, что с точностью в несколько градусов облака вытянуты параллельно хребтам гор. Значит, не только справедливо прежнее утверждение о волновом характере облаков, но и установлено, что основная волна располагалась в подветренной стороне от гор.



Рис. 3. Фото облаков, сделанное в г. Алушта в 17 ч. 50 мин. Вид снизу и вдоль длины

Благодаря тому, что фотографирование велось снизу, более наглядно проявляет себя многослойное строение облака. Кроме того, вновь можно видеть, что границы отдельных слоев в первом приближении представляют веер параллельных прямых. Наконец, очень хорошо видно, что верхние слои облака по сравнению с расположенными на меньших высотах заметно смешаются на север (навстречу основному потоку, как будет показано далее).

На рис. 4 и 5 представлены два фото, сделанные немного позже с точек на шоссе по пути от Алушты к Ангарскому перевалу, - причем к северу от линии гор (см. рис. 2). Фотографии позволяют взглянуть на облако уже не столько снизу, сколько со стороны. Теперь становится понятным, что облако состоит из двух частей. Слева видна северо-восточная часть облака, расположенная, видимо, прямо над районом города Алушта. Разрыв между частями почти полный. Облако, которое мы видим в кадре слева, по своей форме является типичным примером волновых облаков (особенно его нижняя часть). Такие облака по международной классификации именуется как *As lent*, или в переводе как высоко-кучевые чечевице-образные [14] (теперь нередко их называют линзеобразными).

Справа на фото рис. 4 видна основная часть облака. Полностью эту юго-западную, самую протяженную часть облака в полном виде и с разных ракурсов можно видеть на рис. 1 и теперь на рис. 5 ниже. Эта часть имеет форму, которую удастся наблюдать доста-



Рис. 4. Вид на две части облака с наветренной стороны и с близкого расстояния

точно редко, и в первую очередь из-за его большой протяженности и многослойности. На последнем фото особенно хорошо различимо, что облако состоит из не менее, чем восьми слоев.



Рис. 5. Основное облако, вид вблизи и с северной стороны

На рис. 6 представлено фото, полученное спустя заметное время после показанного на рис. 5, в момент времени, когда лучи солнца начали окрашиваться в вечерние тона. Сравнивая изображения облака, представленные на рисунках 6 и 4, следует отметить, что разрыв между частями стал полным. Кроме того, можно видеть, что нижняя часть северо-восточной облачности изменилась заметно. Сравнивая фото основного облака, представленного на рис. 1, 4–6, видим, что за время около часа облако практически не изменялось, изменялась лишь окраска лучей солнца. Это свидетельствует о квазистационарности процесса обтекания гор в обсуждаемом случае. Полезно также отметить, что фотографии на рис. 1, 4–6 не позволяют судить о том, над какой частью рельефа расположено основное облако. О том, что оно расположено над прибрежной частью суши, удалось установить, благодаря фотографи-

ям, сделанным в Алуште.

Теперь полезно сравнить результаты проведенного анализа фотографий облака с теоретическими представлениями о явлении обтекания гор воздушным потоком атмосферы. Огромный объем публикаций по этой теме изложить трудно, однако вполне приемлемое представление об этом могут дать работы [1–3, 5–7, 18–20]. Двумерные теоретические модели этого явления являются самыми распространенными и успешными.



Рис. 6. Обе части облака на закате. Фото с Ангарского перевала. Главные горные хребты на фото видны вдаль и справа, вблизи — склон массива Чатыр-Даг

В работах [2, 3, 6, 7] проведено сопоставление данных измерений и теоретических расчетов таких возмущений над горами Крыма. Данные о пространственных характеристиках облаков получались при этом путем стереофотограмметрических измерений в специальных экспедициях. Теоретические расчеты проводились на основе применения нелинейной двумерной стационарной аналитической трехслойной модели. В результате было установлено, что используемая модель в ряде случаев вполне адекватно предсказывает возмущения вне приземного слоя. Основные особенности рассмотренных возмущений иллюстрируются на рис. 7. Сплошными черными линиями здесь показываются траектории движения частиц воздуха слева направо в вертикальной плоскости (перпендикулярной горному хребту). Рассматривается вариант, когда натекающий поток направлен с северо-запада, а обтекаемый рельеф воспроизводит среднее сечение гор в районе Ялты. На рисунке сечение зачернено. Траектории отожествляются с их высотами z_u в натекающем потоке в км. Перечень этих значений дан внизу рисунка. Красными кривыми на рисунке показаны изолинии отрицательных возмущений температуры в градусах. Соответствующие их значения даны внизу рисунка в диапазоне от -0.25 до -8.5 . При расчетах предполагалось, что натекающий поток состоит из трех слоев, скорость потока в слоях постоянна, одинакова и равна $U = 9.75$ м/с, вертикальные градиенты температур

в слоях постоянны, различны и снизу вверх равны 5.83, 0 и 3 град/км. Нижний слой в модели представляет тропосферу, верхний — всю верхнюю атмосферу.

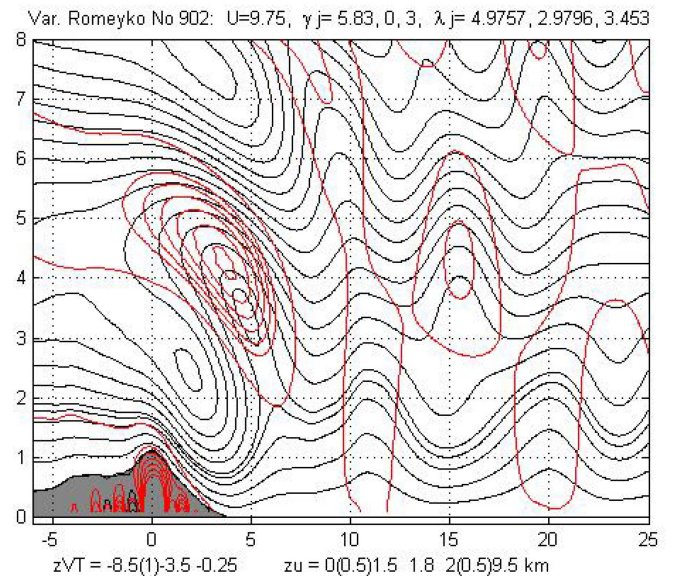


Рис. 7. Двумерная теоретическая картина обтекания гор

Основным масштабом явления, как известно, является масштаб Лира λ_c , введенный в [20] и определяемый соотношением

$$\lambda_c = 2\pi \frac{U}{N}, \quad (1)$$

где величина N представляет частоту Брента–Вяйсяля, т.е. гидростатическую устойчивость атмосферы. В данном случае значение масштаба λ_c в нижнем слое равнялось 4.97 км. Результаты представлены для диапазона высот до 8 км и горизонтальных координат от -6 до 25 км, при этом нулевая координата соответствует положению главной вершины гор.

Очевидно, что волновые облака при обычной не очень высокой влажности натекающего потока в первую очередь могут появиться внутри областей с самыми заметными отрицательными значениями возмущений температуры. В данном и других, ранее рассмотренных случаях, такая область расположена в диапазоне следующих высот и расстояний:

$$z = (0.5 \div 1)\lambda_c, \quad x = (0 \div 1.2)\lambda_c. \quad (2)$$

Здесь гребни волн имеют самые заметные амплитуды, а движущиеся частицы воздуха самые значительные положительные смещения относительно их исходных уровней в натекающем потоке. Подобные области повторяются периодически вниз по потоку и их удобно нумеровать по порядку следования. На рисунке показаны четыре из них. В диапазоне высот, расположен-

ном выше данного, примерно на высоте $2\lambda_c$, нетрудно видеть череду аналогичных областей. В этих областях амплитуды возмущений заметно меньше и облака здесь могут появиться только во вторую очередь – при достаточно высокой влажности. В случаях, когда влажность воздуха в натекающем потоке с высотой изменяется достаточно неравномерно, волновые облака могут стать многоярусными [1–3, 5–7, 12, 13]. Форма изолиний возмущений температуры показывает, что в этом случае более высокие облака по сравнению с нижерасположенными должны смещаться навстречу потоку.

Качественный анализ сфотографированного облака был проведен выше. Он показал, что теоретическим предсказаниям свойств возмущений соответствуют следующие характеристики облака.

1. Оно квазистационарно и двумерно.
2. Оно расположено несколько ниже по потоку от вершин гор.
3. Верхние слои облака по сравнению с нижними смещены по горизонтали навстречу натекающему потоку.

Удачей является то, что представленные фотографии позволяют сделать и некоторые количественные оценки характеристик рассматриваемого облака. Это возможно потому, что: (1) на фотографиях рис. 1 и 6 одновременно с положением границ облака, а также вершин гор массива Бабуган–Яйла видна линия морского горизонта, (2) в нашем распоряжении имеется карта высот на рис. 2 и известны координаты съемки. Рассмотрим на рис. 2 точку фотографирования и пунктирную синюю линию, которая дает (достаточно точно) направление от этой точки к заметным восточным вершинам массива гор. Карта изогипс позволяет оценить высоту над уровнем моря двух точек на этой линии – точки фотографирования и точки на краю горного массива. Их высоты соответственно равны 0.54 и 1.2 км. Карта позволяет также определить, что горная вершина от точки фотографирования находится на расстоянии в 15 км. Для определения пространственных характеристик облака обратимся к рассмотрению геометрии нашей ситуации, воспроизведенной на рис. 8. Точка C на рисунке представляет положение точки фотографирования на Ангарском перевале, а точка A ее проекцию на уровень моря, показанный красной кривой. Точка D отмечает положение заметной вершины гор в восточной части массива Бабуган–Яйла на вертикали к условной поверхности моря. Ее проекция на уровень моря представлена точкой E . При использовании представленной геометрической схемы с достаточной точностью можно не учитывать кривизну поверхности земли. Поэтому будем полагать, что:

$$AE = RC = 15, \quad RE = AC = 0.54, \quad DE = 1.2 \text{ км.}$$

Точки N, M, B представляют условно точки на границах облака в ситуации, если бы последнее располагалось непосредственно над горами: первая и вторая —

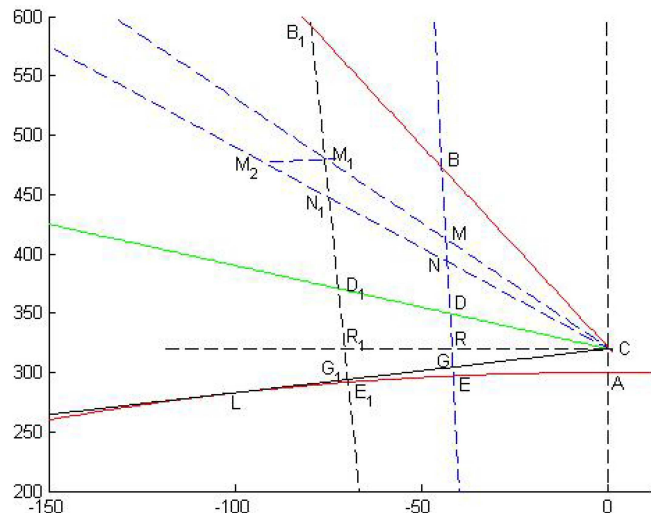


Рис. 8. Геометрия лучей зрения при фотографировании облака. Оцифровка осей на рисунке чисто условная

на границах нижней поверхности облака, третья на самой верхней его границе. Прямая CL представляет луч зрения, по которому из точки фотографирования видна линия горизонта моря. Этот луч пересекает вертикаль BE в точке G и вертикаль B_1E_1 в точке G_1 . На фотографиях рис. 1 и 6 будем мысленно проводить вертикаль через самую высокую точку гор. В этом случае границы облака будут определяться в сечении, включающим синий пунктир на рис. 2. Длины указанных отрезков на фото в относительных масштабах можно характеризовать значениями, представленными ниже:

Таблица 1.

	GD	GN	NM	MB
Рис. 6	13	24.9	8.1	49.5
Рис. 1	21	39	14.4	57.1

Отсюда нетрудно определить длину отрезков GN, NM, MB в долях GD . Обозначая эти безразмерные величины как P_j , получим следующую таблицу значений:

Таблица 2.

P_j	1.86	0.686	2.72	(рис. 6)
P_j	1.91	0.623	3.81	(рис. 1)
PA_j	1.88	0.655	3.27	

PA_j — среднее по двум фото; $j = 1, 2, 3$ — номер отрезка.

Обозначая истинное значение длины отрезка GD как h , истинную длину остальных отрезков можно определять по формуле

$$L_j = P_j \cdot h. \tag{3}$$

Действительное расстояние облаков от точки фотографирования нам неизвестно. Но поскольку безразмерные величины P_j от этого не зависят, значения отрезков L_j для произвольного удаления облаков от наблюдателя будем оценивать по (3) с учетом малости кривизны земли и соответственно справедливости соотношений:

$$R_1C = 15 + y,$$

$$(D_1R_1, R_1G_1, E_1G_1, h) = function(y).$$

Согласно астрономическим данным, линия горизонта моря от точки C с учетом ее высоты отстоит примерно на 87 км. Поэтому в соответствии с представленной геометрией можем с той же точностью получить

$$D_1R_1 = (15 + y) \cdot DR/15 = (15 + y) \cdot 0.66/15.$$

Из треугольников G_1R_1C и LCA , полагая, что углы между прямыми G_1C и R_1C и прямыми LC и LA с достаточной точностью равны, получим

$$R_1G_1 = (15 + y) \cdot 0.54/87. \quad (4)$$

После этого нетрудно вывести соотношения:

$$\begin{aligned} h &= D_1R_1 + R_1G_1 = (15 + y) \cdot q, \\ q &= 0.66/15 + 0.54/87 = 0.0502, \end{aligned} \quad (5)$$

$$E_1G_1 = (87 - 15 - y) \cdot 0.54/87 = (72 - y) \cdot 0.54/87. \quad (6)$$

Теперь можно оценить диапазон высот, на которых могли располагаться облака в зависимости от удаления. Необходимо учитывать, что при увеличении удаления погрешность оценок по приведенным формулам растет почти пропорционально удалению. Однако мы знаем, что толщина облака и его ширина не меняются при изменении расстояния. Поэтому эти величины будем определять только для самого малого расстояния. Фотографии, сделанные в Алуште, показали, что облака располагались к югу от гор. Если наше предположение о волновой природе облаков верно, то согласно данным [1–3, 5–7, 11, 12] количественные оценки пространственных характеристик следует провести для диапазона следующих значений удаления от гор $y = 0 \div 15$ км. Оценку высоты нижней границы облаков H_0 и их толщины dH относительно уровня моря будем проводить, используя усредненные PA_j и нижеследующие формулы:

$$\begin{aligned} H_0 &= E_1G_1 + G_1N_1 + N_1M_1 = \\ &= (72 - y) \cdot 0.54/87 + (15 + y) \cdot q \cdot (P_{c1} + P_{c2}), \end{aligned} \quad (7)$$

$$dH = h \cdot P_{c3} = (15 + y) \cdot q \cdot P_{c3}, \quad y = 0. \quad (8)$$

Ширина облаков D_y вдоль направления съемки определяется длиной отрезка M_2M_1 . Эту величину

определим из треугольников $M_2M_1N_1$ и N_1R_1C , используя соотношения (4) и формулы

$$\begin{aligned} D_y &= M_2M_1 = N_1M_1 \cdot R_1C/R_1N_1 = \\ &= h \cdot P_{c2} \cdot (15 + y)/R_1N_1, \end{aligned}$$

$$R_1N_1 = G_1N_1 - G_1R_1 = h \cdot P_{c1} - (15 + y) \cdot 0.54/87,$$

$$D_y = h \cdot P_{c2} \cdot (15 + y)/(h \cdot P_{c1} - (15 + y) \cdot 0.54/87). \quad (9)$$

Поперечную к горам ширину облаков D_g отсюда нетрудно оценить, если воспользоваться тем, что: а) облака параллельны линии гор, б) линия гор от направления широт отклоняется на 25° , в) направление фотографирования из точки C отклоняется от направления широт на 72° . Отсюда получаем, что

$$D_g = D_y \cdot \sin(47^\circ) = 0.73 \cdot D_y. \quad (10)$$

В результате было найдено, что

$$dH = 2.5, D_g = 4.1 \text{ км}. \quad (11)$$

Тогда получаем, что высоты верхней границы облака H_1 и нижней границы H_0 изменяются (в км) в следующем диапазоне:

Таблица 3.

y	0	5	10	15
$H_1 = H_0 + dH$	4.8	5.4	6.0	6.6
H_0	2.3	2.9	3.5	4.1

Полученные значения диапазона высот облаков, вертикальная их толщина и горизонтальная ширина достаточно хорошо согласуются с теоретическими данными (2), а так же имеющимися данными о возмущениях над горами Крыма [1–3, 6, 7, 12]. Учитывая все ранее выявленные характеристики рассмотренного облака, приходим к окончательному выводу о том, что облако действительно существовало в гребне волн возмущений атмосферы.

Обсудим еще одну проблему в связи полученными фотографиями. На рис. 9 представлен результат обработки фото рис. 6, при которой была выделена самая интересная часть изображения и несколько изменен цветной фильтр. Это позволяет с большей детальностью рассмотреть облака и вершины массива гор. Фото демонстрирует, как по мере удаления на юго-запад изменяется облако. Ясно, что это происходит из-за изменения формы и высоты гор. Анализируя изогипсы высот, представленные на рис. 2, нетрудно видеть, что в районе г. Ялта прибрежная полоса суши расширяется за счет резкого сужения полосы высоких гор. Еще западнее горы уменьшают свою высоту примерно на 200 м.

На фотографии рис. 9 мы видим кроме основного еще шесть облаков. Пять из них имеют вид тонких



Рис. 9. Облачность и горы в деталях. Вдали массив основных гор, вблизи — склон массива Чатыр-Даг

параллельных полос и вероятнее всего являются волновыми. Одно облако, судя по форме, кучевое. Первая полоса видна ниже основного облака в центре кадра. Ниже можно видеть вторую полосу из двух облаков и кучевое облако между ними. Третья и четвертая полосы видны на самом дальнем краю справа. Ясно, что чем ниже положение этих полос на фото, тем они дальше от нас. Весьма вероятно, что эти облака визуализируют существование вниз по потоку от гор и основного облака второй, третьей, четвертой и пятой волновых гряд. Все четыре полосы солнцем не освещены. Анализ справочных данных показал, что в момент фотографирования вертикальный угол солнца был близок к нулю. Затененность полос однозначно свидетельствует, что указанные облачные полосы располагались ниже границы тени солнца, т.е. что угол солнца был отрицательным. Кучевое облако, как легко видеть, хорошо освещено солнцем. Анализ положения этого облака на других фотографиях, полученных из разных точек и с разных высот, позволяет предположить, что оно было расположено ближе к наблюдателю и имело меньшую высоту, что оно свидетельствовало о наличии локальных конвективных процессов в приземном слое над горами.



Рис. 10. Вид облаков у края гор далеко на юго-западе

Наконец, рассмотрим фото, представленное на рис. 10. Здесь крупным планом показана самая правая часть предыдущей фотографии. Представьте себе, что Вы рассматриваете только одну эту фотографию и никакой дополнительной информации на этот счет не имеете. Какие чувства и мысли у Вас появятся? Удивление!? Восторг! Опасение? Для опытного наблюдателя после сделанного выше подробного анализа имеющейся информации все выглядит иначе. Мы знаем, что облака визуализируют движения частиц воздуха при обтекании гор. Поэтому представленное фото заставляет задуматься о том, как локальные изменения орографии привели к заметным отклонениям здесь от квазидвумерного характера обтекания гор, как конкретно проявляет себя третья компонента возмущений и т.д. Ответить на эти вопросы невозможно без прямых измерений пространственных характеристик данного облака и в первую очередь того, вблизи каких гор оно расположено. Мы знаем только, что оно далеко на западе от Алушты — в районе Ялты или еще дальше, т.е. там, где форма гор резко меняется. Мы знаем, что это одно из проявлений природы, которое еще предстоит исследовать и понять.

Вместе с тем, данная фотография позволяет получить одно важное уточнение наших знаний. Для этого обратим внимание на нижнюю поверхность самого верхнего слоя облака. Наветренный край этого слоя хорошо освещен, тогда как нижняя его поверхность находится в тени. Лучи солнца, как уже отмечалось выше, подсвечивают слои облака никак не сверху. Так откуда тень? Поскольку со стороны солнца нет объектов, которые могли бы создать эту затененность, следует сделать вывод, что тень определяется кривизной данного облачного слоя и что выпуклость этой кривизны направлена вверх. Кривизна слоя не столь велика, и поэтому край слоя не препятствует наблюдателю видеть эту тень снизу. Подобные тени можно видеть и у других слоев облака, например, у второго снизу. Следует также обратить внимание на то, что тень на нижней поверхности самого нижнего слоя существенно слабее. Это позволяет предположить, что здесь кривизна слоя заметно меньше. Выводы о кривизне полностью соответствуют данным теории, проиллюстрированным на рис. 7. Тем самым нам впервые удалось подглядеть у природы, что траектории движения частиц воздуха в зоне облака имеют кривизну с выпуклостью, обращенной вверх.

Представленные фотографии и проведенный анализ продемонстрировали, что облака могут очень многое поведать о сложных процессах в атмосфере. Было показано, что созданная методика анализа фотографий облаков типа *Ac lent* уже сейчас помогает получать много интересной информации. Продолжение исследований в этом направлении несомненно еще больше расширит такие возможности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить, что настоящая статья написана в память недавно умершему Виталию Александровичу Ромейко. В статье используются

не только его фотографии и комментарии, в ней используется выполненная П. А. Даниным координатная привязка одного из снимков, а также ценные советы, сделанные Н. Н. Перцевым в проведенных дискуссиях. Автор глубоко признателен всем за помощь.

-
- [1] *Кожевников В.Н.* Возмущения атмосферы при обтекании гор. М.: Научный Мир, 1999.
 - [2] *Кожевников В.Н.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. **55**, № 4. С. 49. (*Kozhevnikov V.N.* // *Izvestija. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2019. **55**, № 4. P. 344.)
 - [3] *Кожевников В.Н.* // *Ученые записки физического факультета Московского университета.* 2019. № 3. 1930901.
 - [4] *Бибилова Т.Н., Дюбюк А.Ф., Кожевников В.Н.* Некоторые результаты сопоставления теории и наблюдений волновых облаков. / Тр. VIII Всесоюзной конференции по физике облаков и активным воздействиям. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970.
 - [5] *Кожевников В.Н., Бибилова Т.Н., Журба Е.В.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1977. **8**, № 5. С. 451.
 - [6] *Бибилова Т.Н., Журба Е.В., Кисельникова В.З., Кожевников В.Н.* Подветренные орографические возмущения в Крыму. // Тр. ГМЦ. 1981. Вып.238, С. 93.
 - [7] *Кожевников В.Н., Бибилова Т.Н., Журба Е.В.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1986. **22**, № 7. С. 682.
 - [8] *Хргиан А.Х., Кожевников В.Н.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1988. **24**, № 9. С. 913.
 - [9] *Кожевников В.Н., Журба Е.В., Романов Ю.А.* Некоторые результаты стереофотограмметрических наблюдений облаков с корабля в тропической зоне Атлантики // Тр. Межведомственной геофизической экспедиции. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. С. 429.
 - [10] *Кожевников В.Н., Бибилова Т.Н., Журба Е.В., Романов Ю.А., Хргиан А.Х.* // *Метеорология и Гидрология,* 1977, № 8. С. 82.
 - [11] *Мемариан М.Х., Кожевников В.Н., Дмитриева–Араго Л.Р.* // *Метеорология и гидрология.* 2009. № 9. С. 60.
 - [12] *Кожевников В.Н., Беданов М.К.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. **34**, № 4. С. 545.
 - [13] *Кожевников В.Н.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. **58**, № 2. С. 138.
 - [14] *Хргиан А.Х.* Атлас облаков. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978.
 - [15] *Гутман Л.Н.* Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969.
 - [16] *Кожевников В.Н.* Обзор современного состояния теории мезомасштабных орографических неоднородностей поля вертикальных токов. // Тр. ЦАО. 1970. Вып. 98, С. 3–40.
 - [17] *Lin Y.-L.* *Mesoscale Dynamics.* Cambridge, University Press, 2007.
 - [18] *Кожевников В.Н.* // Изв. РАН. Серия геофизическая. 1963. № 7, С. 1108.
 - [19] *Кожевников В.Н.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1968. **4**, № 1. С. 33.
 - [20] *Lyra G.* // *Z. angew. Math. und Mech.* 1943. Н. 1. P. 1.

Example of using the method of analysis of wave cloud photography over the Crimea mountains

V. N. Kozhevnikov

*Department of Physics of Atmosphere, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
E-mail: kozhvn@mail.ru*

The paper presents a method for visual analysis of photographs of a wave multilayer cloud. It is shown that the cloud is located in the crest of orographic waves above the main ridges of the Crimean mountains. It is shown that the spatial characteristics of the cloud correspond to the results of calculations based on the previously created nonlinear model of the flow around mountains.

PACS: 93.90.+y .

Keywords: atmospheric physics, clouds, hydrodynamics, modeling, mountain flow, Lira scale.

Received 2022.

Сведения об авторе

Кожевников Валентин Николаевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 931-62-45, e-mail: kozhvn@mail.ru.