

МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОГО АТМОСФЕРНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НИЖНЕЙ ЧАСТИ УЩЕЛЬЯ РЕКИ ВЕРЕ

¹И.Б. Хведелидзе, ¹М.С. Чхитунидзе, ²Н.И. Жонжолაძე

¹Институт геофизики им. Михаила Нодиа, ТГУ

²Телавский государственный университет им. Я. Гогебашвили
marina_chxitunidze@yahoo.com

Введение. В Грузии много горных рек, но среди них, у реки Вере – отличительный специфический признак – это достаточно сильная и быстрая урбанизация конца последних десятилетий, что и продолжается ныне. С этой точки зрения, для наблюдения, можно аналог ущелья Вере искать в Европе. Например, в северной Италии, в прилегающих к Альпам регионах, или, возможно, на Балканах. Известно, что густое заселение и, в особенности влияние высотных зданий и небоскребов на формирование микроклимата, возможно изобразить одним тривиальным фактором, в частности искусственным изменением естественной орографии ущелья, что вносит определенное возмущение в формировании естественного теплового баланса в ущелье. Также отмечено, что в течение последних двух десятилетий чувствуется влияние изменения орографии на картину атмосферной циркуляции. В частности, растет интенсивность ветра, у этого явления много вызывающих причин, но, вероятно, в первую очередь, это – возмущение локального температурного режима ущелья Вере, что вызвано увеличенной за последнее время радиацией отраженных от поверхности урбанных объектов солнечных лучей. Сегодня, на обеих сторонах ущелья плотно размещены высотные здания, что еще более помогает квазистационарному возмущению локального температурного поля в ущелье. Отметим, что действующие в бывшем Советском Союзе строительные нормы, требуют и сегодня в нашей стране, при строительстве многоэтажных домов, т.н. точной защиты условия «Соляризации» [1]. Этими же нормами, по определенному правилу должны быть распределены фасады зданий (по направлению юго-востока и востока). Несмотря на то, что это требование в основном защищено в построенных ныне многоэтажных зданиях, их тесное распределение вдоль ущелья Вере обязательно действует на динамическую картину формирования и развития приземных ветров. С этой точки зрения значительно узкое ущелье Вере можно уподобить криволинейному каналу, в котором формируется движение воздушных масс и налицо возмущение, вызванное градиентом атмосферного давления из-за столкновения с высокими стенами канала. Такой же эффект, или регулируемое возмущение атмосферных потоков, также характерно для узких каньонов, подобных ущелью Вере, в случае, если они ограничены вдоль всей длины довольно высокими стенами. При росте высоты приблизительно до 200-250 метров, растет также скорость ветра, величина которой при достижении определенной высоты, постепенно уменьшается, притом настолько, что выше т.н. уровня «инверсии» ее направление меняет

знак. Это известный факт, который по существу одинаково наблюдается практически во всех ущельях, по количественным данным же должно быть изображено по-разному. Например, на северном Кавказе в ущелье реки Цеа, длина которой 17км, H_0 – 1100 м, а в городе Алма-Ате, орография которой очень похожа на Тбилисскую, протекает с таким же названием маленькая горная река Алмаатинка, для которой высота «инверсии» $H_0=800$ м [2]. Общеизвестно, что при росте неустойчивости атмосферы, высота «инверсии» так же, как и скорость ветра, растет. В спокойных, нормальных, менее облачных естественных условиях, на склоне горы течение ветра, приблизительно через 30 минут после захода солнца, происходит в нижнем направлении ущелья, в теплых периодах, перед восходом солнца, ветер дует в том же направлении приблизительно в течение одного часа, а после этого направление ветра меняется с нисходящего на восходящее. В спокойных условиях характерная скорость этого ветра 1-3 м/сек.

Явление, которое описано выше, по существу должно развиваться по одинаковой схеме в случае, когда дело имеем с ущельем маленькой горной реки, что характеризует и ущелье Вере. Главная причина, вызывающая похожий эффект, неоднородность температурного поля околоземной нижней атмосферы. Главная локальная характеристика этой неоднородности - это высота хребта. Надо учесть и то, что на склонах гор суточные изменения температуры поверхности земли, в отличие от естественных условий, меняются в достаточно большом диапазоне, т.к. они ограничивают теснение масс воздуха вдоль склонов хребтов.

Автором математической модели, описываемого этого процесса, является создатель теории граничного слоя Л. Прандтль. Известное аналитическое решение Л. Прандтля получено на основе следующего упрощенного допущения: рассматривается движение, только развитое в вертикальной плотности XZ , склон гор наклонен к горизонту довольно малым углом α , исходя из того, что имеем малый линейный масштаб, возможно пренебречь эффектом Кориолиса; не рассматривается (не происходит) возникновение конвекционных потоков, т.к. вдоль хребта масса воздуха не отстает от поверхности, движение настолько медленное, что можно пренебречь ускорением. В общем, в ущельях горных стран, особенно в теплое время года, наблюдается достаточно регулярное изменение воздушных регуляций. В ущелье на склонах гор в течение дня ветер дует (выше их) сверху, ночью же ниже - вдоль их.

Предложенная Прандтлем теория о воздушных потоках, переходящих сверху через горные склоны звучит так: допустим, что склон достаточно большой горы отклонен от горизонта на угол α , который достаточно мал, для того, чтобы текущие потоки не выделились от него и не создали конвекционные потоки. Для данного случая, при рассмотрении системы допускаем, что можно пренебречь ускорением, т.к. масштаб выявления мал (несколько км), возможно пренебречь силой Кориолиса и рассмотрим движение только в плоскости XZ , тогда будем иметь формулы:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) - g\rho, \quad (1)$$

Где η коэффициент турбулентной вязкости, допустим, что в свободной атмосфере потенциальная температура $\tilde{\Theta}$ растет линейно по высоте и кроме того, теплый слой вносит в атмосферу температурные возмущения, которое представляет функцию n , зависящую от расстояния до склона, когда

$$\tilde{\Theta} = \tilde{\Theta}_0 + Bz + \tilde{\Theta}'(n) \quad (2)$$

Если пренебрежем изменением плотности, связанным с изменением давления, тогда будет формула

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(\tilde{\Theta} - \tilde{\Theta}_0)] = \rho_0 [1 - \beta Bz - \beta \tilde{\Theta}'(n)],$$

где $\beta = 1/273 \text{grad}^{-1}$.

Переходим на новую систему координат (s, n) , где ось s направлена на склоне вверх, а n – нормаль склона, тогда

$$x = s \cos \alpha - n \sin \alpha,$$

$$z = s \sin \alpha + n \cos \alpha.$$

Обозначим через v составляющую скорости, которая направлена вдоль склона кверху т.е.

$$v = u \cos \alpha + w \sin \alpha$$

Если применим (1) формулу и явную зависимость

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial n^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial s^2}$$

и $\frac{\partial^2 v}{\partial s^2} = 0$ условие, получим выражение

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial p}{\partial z} \sin \alpha = \eta \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \cos \alpha + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \sin \alpha \right] - g\rho_0 \sin \alpha [1 - \beta Bz - \beta \tilde{\Theta}'(n)] = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial n^2} - g\rho_0 \sin \alpha [1 - \beta Bz - \beta \tilde{\Theta}'(n)] \quad (3)$$

В состоянии спокойствия будет:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{v=0} = -g\rho_0 \sin \alpha [1 - \beta Bz] \quad (4)$$

т.к. мы не учитываем ускорение, возможно признать, что давление в состоянии спокойствия такое же, как давление при медленном передвижении, учитывая (4) и (3) получим

$$g\rho_0 \beta \sin \alpha \tilde{\Theta}'(n) + \frac{\partial^2 v}{\partial n^2} = 0, \quad (5)$$

Напишем уравнение переноса тепла для новой (s, n) системы координат, когда $\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = 0$, тогда имеем уравнение

$$v \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial s} = \alpha^2 \left(\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial sn^2} \right), \quad (6)$$

но,

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial s} = \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \sin \alpha = B \sin \alpha,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial sn^2} &= \frac{\partial^2 \bar{\theta}'(n)}{\partial n^2} \\ v B \sin \alpha &= \alpha^2 \frac{\partial^2 \bar{\theta}'(n)}{\partial n^2} \end{aligned} \quad (7)$$

и (6) после дифференцирования дважды по n , когда в (5) вставим $\eta/\rho_0 = v$, получим

$$\frac{\partial^4 \bar{\theta}'(n)}{\partial n^4} + \frac{g \beta \sin^2 \alpha \bar{\theta}'(n)}{v \alpha^2} = 0. \quad (8)$$

Возмущение температуры должно сравниться с величиной $\bar{\theta}$, когда $n = 0$ и когда n стремиться к бесконечности, соответствующее (8) решение имеет следующий вид:

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}'_0 e^{-\frac{n}{L}} \cos \frac{n}{L} \quad (9)$$

где

$$L = \sqrt[4]{\frac{4v\alpha^2}{g\beta \sin^2 \alpha}} \quad (10)$$

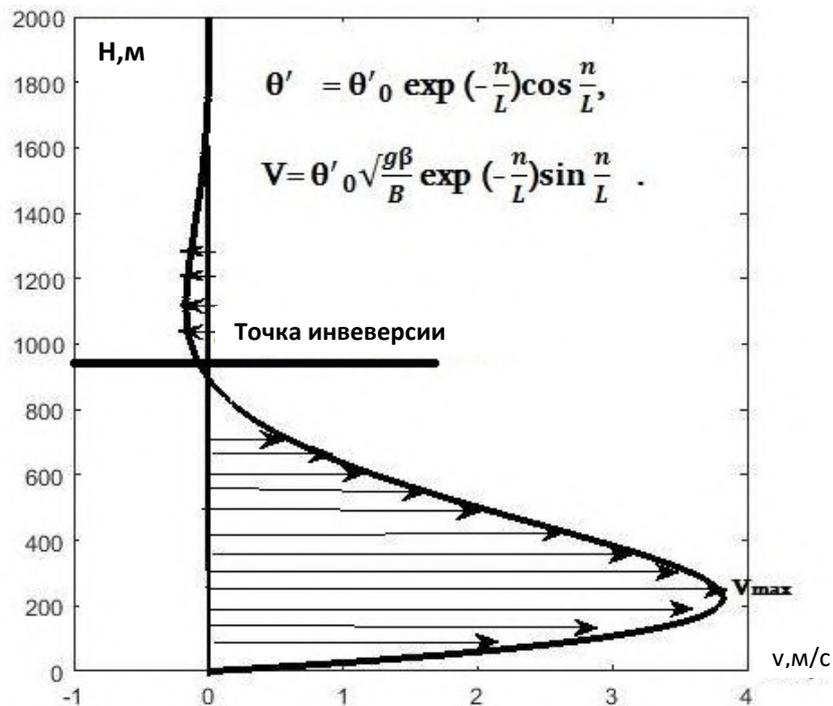


Рис.1. Профили скорости

Если применим (6), получим:

$$v = \frac{\alpha^2}{B \sin \alpha} \frac{\partial^2 \theta'}{\partial n^2} = \theta'_0 \sqrt{\frac{g\beta\alpha^2}{vB}} e^{-\frac{n}{L}} \sin \frac{n}{L} \quad (11)$$

Значит скорость равна нулю на поверхности наклона (склона) и растет до максимума v_m , когда высота $n_m = \frac{\pi L}{4}$.

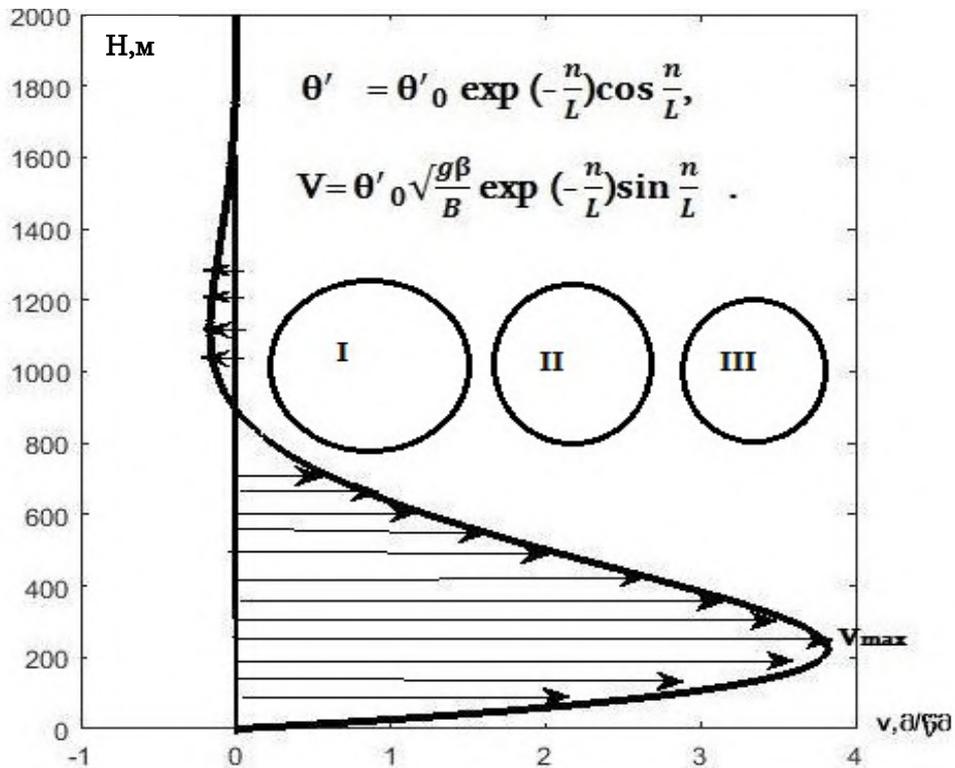


Рис.2. Профили скорости

Соответственно, максимальная скорость ветра пропорциональна аномалии температуры и стремительно растет при нестабильности атмосферы, т.е. должна увеличиться днем и ослабеть ночью. Наблюдением становится ясным, что оно не зависит от угла наклона склона.

Наблюдая данную систему найдем: если мы выберем n_0 высоту более малой, чем есть n_m , легко можно доказать, что при увеличении угла наклона α , скорость на этой данной высоте начнет увеличиваться.

Согласно модели Прандтля можем заключить, что в свободной атмосфере температура θ вместе с высотой линейно увеличивается, а поверхность склона вносит возмущение θ' , которое является функцией высоты n удаления от склона.

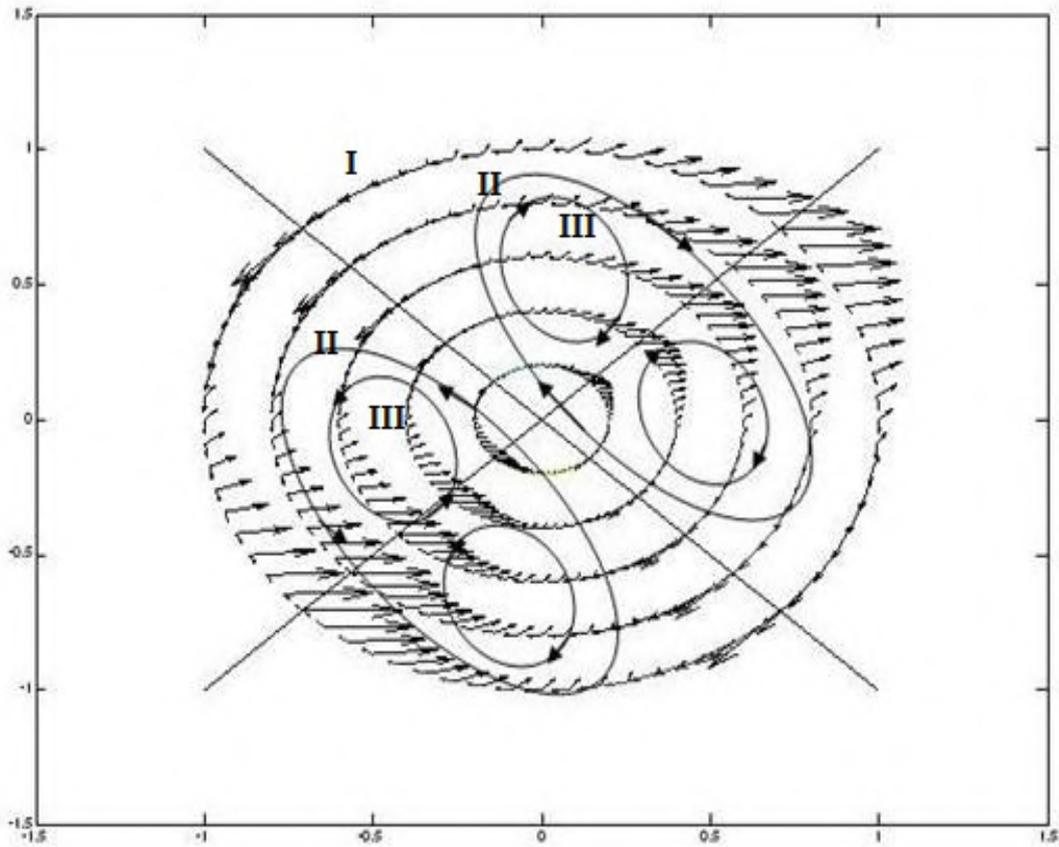


Рис.3. Разложение неоднородного урагана

Для атмосферы, движение которой турбулентное, передача температуры и коэффициенты кинематической вязкости можно считать равными между собой, для параметра θ' было получено уравнение (8), где β -коэффициент температурного расширения, g – ускорение силы тяжести, ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, а $B = \text{const}$ вертикальный температурный градиент.

Общее решение уравнения (8) состоит из четырех членов, хотя в монографии [3] дан только тот член общего решения, который удовлетворяет следующему конкретному условию

$$\begin{aligned} \theta' &= \theta'_0, & \text{где } n &= 0, \\ \theta' &= 0, & \text{где } n &= \infty, \end{aligned} \quad (12)$$

Вместе с этим, подразумевается эффект инверсии скорости ветра. Соответствующее решение имеет вид (9), в котором характерным вертикальным масштабом участвует высота максимума скорости, решаемая формулой (10). Образованное вдоль склона хребта температурное возмущение вызывает вначале конвективное движение масс воздуха, скорость которого дана (11) формулой.

Таким образом, выражение (11) дает вертикальный профиль скорости ветра, также определяет высоту ($n_m = \frac{L\pi}{4}$) максимума скорости и высоту инверсии, которая соответствует первому минимуму тригонометрической функции ($n_m = \pi L$). Но, несмотря на очевидность такого решения, по нашему мнению, применение только одного частного

решения, достаточно ограничивает практическую стоимость модели Прандтля. В частности, считаем, что физическая картина будет более совершенной, если примем во внимание эффект перманентного изменения во времени граничных условий. Такое явление вполне реально для атмосферных процессов. Известно также, что учет этого часто вызывает значительную количественную коррекцию результатов долгосрочных прогностических метеорологических задач. Поэтому, естественно соображение, что эффект изменения граничных условий должен быть значительным в короткопериодных локальных атмосферных процессах. В частности, вероятно, что в узких каньонах, подобно ущелью Вере, возмущение температурного поля из-за антропогенного воздействия, не зависит только от естественных факторов, что в пределах модели Л. Прандтля. В виде анализа должно быть учтено влияние урбанического эффекта на локальное температурное поле. Лучше, рассмотрим еще один (12) различный вариант граничных условий, который также учитывает эффект инверсии

$$\begin{aligned} \theta' &= \theta'_0, & \text{когда } n &= 0, \\ \theta' &= \infty, & \text{когда } n &= \infty. \end{aligned} \quad (13)$$

Этим граничным условиям удовлетворяет еще одно частное решение уравнения (8), которое отличается от (9) только знаком экспоненциального множителя

$$\theta' = \theta'_0 \exp\left(\frac{n}{L}\right) \cos \frac{n}{L}, \quad (14)$$

Формула соответствующей скорости будет

$$V_2 = -\theta'_0 \sqrt{\frac{g\beta}{B}} \exp\left(\frac{n}{L}\right) \sin \frac{n}{L}. \quad (15)$$

Что в конечной сумме вызывает изменение уравнения инверсии, поэтому, эффект инверсии будет иметь место на различной высоте ($n_m = \frac{3L\pi}{4}$), так же, как и будет разным вертикальный профиль скорости.

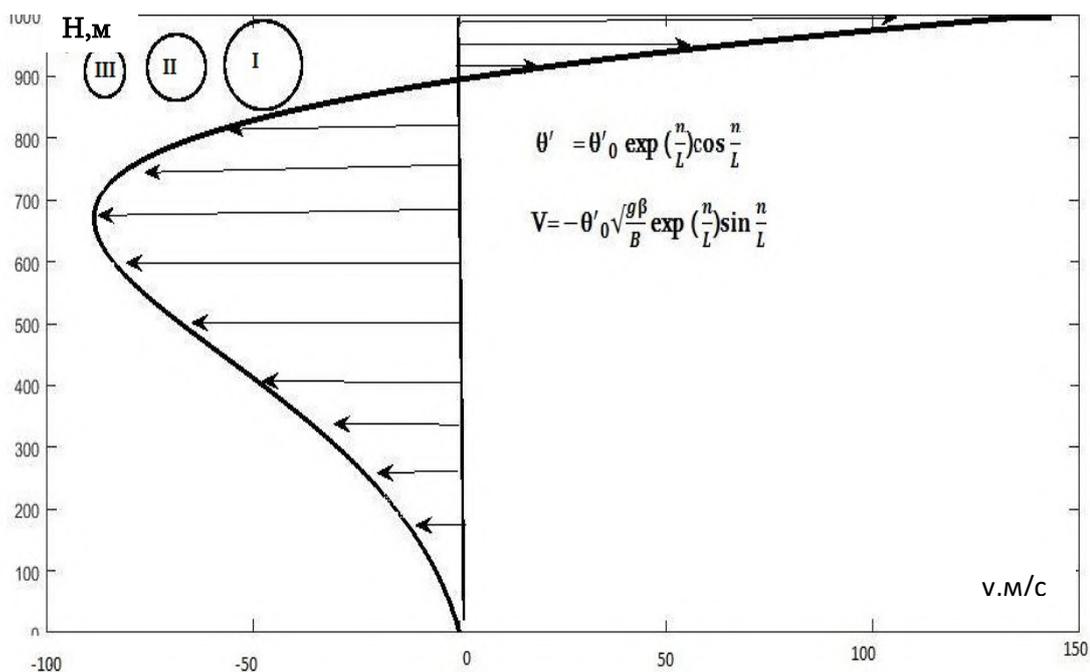


Рис.4. Вертикальный профиль скорости

У профиля полученной скорости есть две особенные точки, первая V_{max} – точка, где скорость бывает максимальной, но направление скорости не меняется, знак производного же – меняется. Вторая особенная точка инверсии, где скорость равна нулю и направление скорости меняется, эта вторая особенная точка (инверсии) интересна, т.к. здесь физически более прощще должно произойти образование вихрей и затем – распад, подразумеваем неоднородный вихрь приблизительно такой, какой он изображен на рисунке.

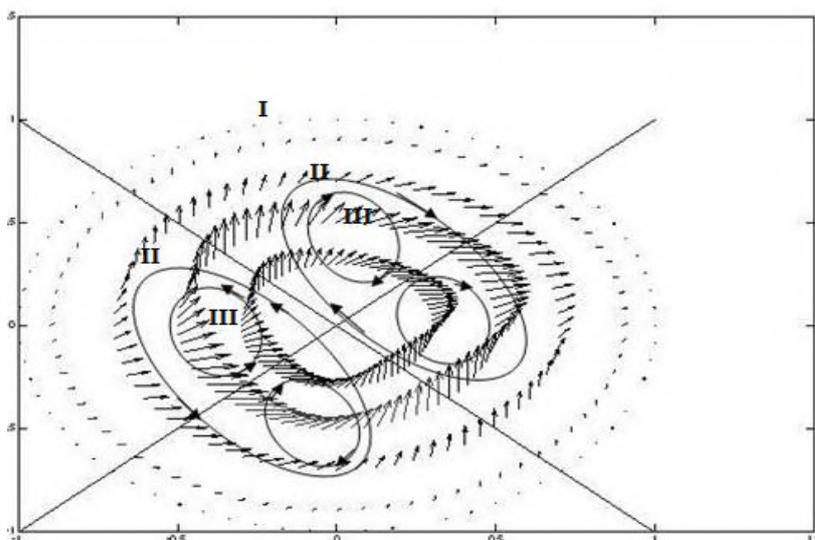


Рис. 5. Распад вихрей

Хотя, в этом случае возникает вопрос: есть ли практическая стоимость у такого решения задачи Л. Прандтля, асимптотическое поведение которой не удовлетворяет

условию убывания возмущения температурного поля в том случае, когда $n \rightarrow \infty$? При таком стремлении, когда $n \rightarrow \infty$ при одном взгляде, (14) решение ошибочное, т.к. в общем случае в возмущении всегда подразумевается только малое изменение основной величины, хотя, модель Прандтля – специфического характера, для получения уравнения (8) была применена такая модель изменения температурного поля, которая формально допускает вместе с высотой неограниченное увеличение температуры, что в общем некорректно для температуры Земли и дается формулой (2).

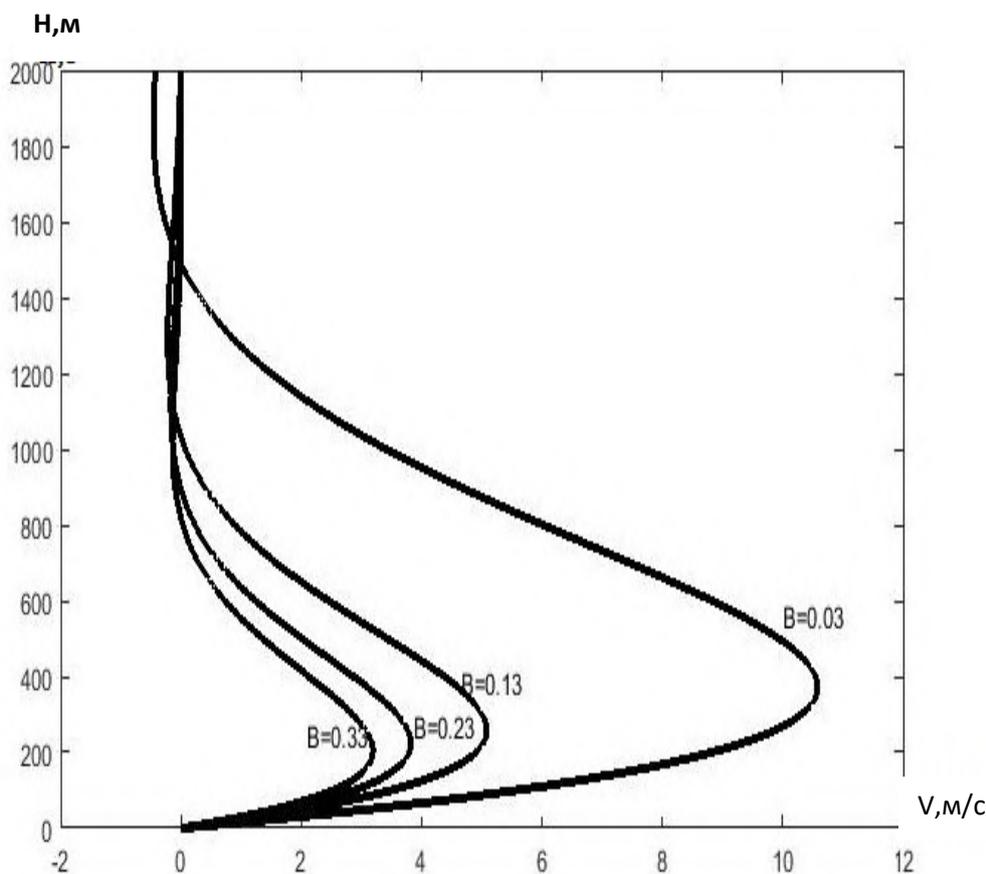


Рис.6. Изменение вертикального температурного градиента

Заключение. Реально, в модели Л. Прандтля имеет место кажущее сопротивление, если предположим, что она справедлива только для малых высот. Действительно, целью этой модели является определение вертикального профиля и высоты инверсии направления слабого ветра, параллельного поверхности хребта и вызванного возмущением температурного поля в нижней атмосфере. Поэтому, реально, область корректности решения (14), подобно (11), ограничена прилегающей окрестностью уровня инверсии. Именно, поэтому физическая стоимость задачи Л. Прандтля не только сомнительна, но и явно растет добавлением еще одного дополнительного решения. В таком случае, становится возможным неявное моделирование эффекта изменения высоты инверсии во времени из-за перманентного изменения начальных условий. По нашему мнению, вероятность именно этого явления значительно возросла в ущелье Вере в

результате урбанического воздействия, что, со своей стороны, должно влиять на локальные гидрометеорологические характеристики.

Литература:

1. Кереселидзе З., Одилавадзе Д. Гидродинамическая модель конусообразной подземной лавовой трубки. Труды института геофизики, т. 67, 2017, с. 5-19.
2. Хргиан А.Х. Физика атмосферы, т.2. Ленинград, Гидрометеиздат, 1978, 237 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Гл. XX, Москва, Наука, 1974.
4. Амиранашвили А.Г., Кереселидзе З.А., Митин М.Н., Хведелидзе И.Б., Чихладзе В.А. Тревожные факторы микроклимата долины реки Вере и их влияние на интенсивность паводков. Труды Института геофизики им. Михаила Нодиа, т. 69, 2018, с.196-210.
5. Kereselidze Z., Khvedelidze I. Shergilashvili G. On the Probable Technical Reasons of the Devastating Flood in 2015 in Tbilisi Journal of the Georgian Geophysical Society, Physics of Solid Earth, Atmosphere, Ocean and Space Plasma, v.21(2), 2018, pp. 5 -16.
6. კერესელიძე ზ., შერგილაშვილი გ. მდინარე ვერეს 13.06.2015 წლის წყალმოვარდნა და დახურული კალაპოტის ჰიდროდინამიკური პრობლემა. გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, ტ. 66., 2016, გვ. 199-221.

ვერეს ხეობის ქვედა ნაწილის ლოკალური ატმოსფერული შეშფოთების მოდელი

ი. ხვედელიძე, მ. ჩხიტუნიძე, ნ. ჟონჟოლაძე

რეზიუმე

მდინარე ვერეს ხეობაში ალმატინკას ხეობის ანალოგიურად, გეოფიზიკური პარამეტრების მსგავსების საფუძველზე, შესაძლებელია დღე-ღამური ტემპერატურის ცვლილებით გამოწვეული ლოკალური ატმოსფერული დინებების სურათის ვერტიკალური ჭრილის მოდელირება, რისთვისაც გამოვიყენეთ სასაზღვრო ფენის თეორიის შემქმნელის ლ. პრანდტლის ცნობილი მათემატიკური მოდელი. მოცემულ ნაშრომში მოვახდინეთ ამ მოდელის მოდიფიკაცია ტემპერატურული ველის შეშფოთების სასაზღვრო პირობების ცვლილების დაშვების ფარგლებში, რაც თვისებრივად შესაძლებელია ნებისმიერი პატარა მთის მდინარის კანიონში. ფიზიკური ანალოგიის გარდა ჩვენს მიერ გამოყენებულია ბრუნვის სიჩქარეთა ველის კინემატიკური მოდელი, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია მსხვილმასშტაბოვანი ატმოსფერული ქარის გენერაცია ჰორიზონტალური ინვერსიის ზედაპირის მახლობლად.

Модель локального атмосферного возмущения нижней части ущелья реки Вере

И.Б. Хведелидзе, М.С. Чхитунидзе, Н.И. Жонжолодзе

Реферат

В ущелье реки Вере, аналогично ущелью реки Алмаатинка, на основе подобия геофизических параметров, возможно моделирование картины вертикального разреза локальных атмосферных течений, вызванных суточными изменениями температуры. Для этого была применена известная математическая модель Л. Прандтля – основателя теории пограничного слоя. В данной работе показана модификация этой модели в пределах допущения изменений граничных условий возмущения температурного поля. Это возможно в каньоне реки произвольно малой горы. Кроме физической аналогии, нами применена кинематическая модель вращения поля скоростей. С помощью чего и возможна генерация крупномасштабного атмосферного ветра вблизи поверхности горизонтальной инверсии.

Model of Local Atmospheric Disturbance of Lower Part of Gorge of River Vere

I. Khvedelidze, M. Chkhitunidze, N. Zhonzholadze

Abstract

In the Vere River gorge, similar to the Almaatinca River gorge, based on the similarity of geophysical parameters, it is possible to model the vertical section pattern of local atmospheric currents caused by daily temperature changes. For this purpose, the well-known mathematical model of L. Prandtl, the founder of the theory of the boundary layer, was used. This paper shows a modification of this model within the limits of assuming changes in the boundary conditions of the temperature field disturbance. This is possible in the canyon of the river arbitrarily small mountain. In addition to the physical analogy, we have applied a kinematic model of velocity field rotation. With this it is possible to generate large-scale atmospheric wind near the surface of horizontal inversion.