

Использование изэнтропического анализа в оперативном краткосрочном прогнозе погоды

Ю. И. Юсупов

НПЦ "Мэп Мейкер", e-mail: usupov@gismeteo.com

В статье описывается программное средство, выполненное в технологии ГИС Метео, предназначенное для оперативного построения карт изэнтропического анализа. На примере конкретного случая – неожиданно сильного снегопада в Московском регионе 7 декабря 2009 г., проведено исследование атмосферных процессов. Выявлено, что аномалия потенциального вихря, образовавшаяся над Московским регионом, способствовала созданию циклонической циркуляции в нижней тропосфере и подъему близкого к насыщению воздуха. По данным наблюдений, осадки носили конвективный характер, хотя наличия конвективной неустойчивости обнаружено не было. Исследование эволюции эквивалентно-потенциального вихря в нижней тропосфере показало наличие условной симметричной неустойчивости, благодаря которой произошло развитие влажной наклонной конвекции.

The issue describes the software designed in GIS Meteo technology, aimed at isentropic analysis map making. The research of atmospheric processes was made on the basis of a case study – an unexpectedly heavy snowfall occurred on December 7, 2009 in Moscow region. In the course of research it was revealed that potential vorticity anomaly formed above Moscow region impacted lower troposphere cyclonic circulation forming and close to saturation air rising. The precipitation was mainly convective, although convective instability was not revealed. The evaluation of equivalent potential vorticity in lower troposphere showed conditional symmetric instability which lead to moist slantwise convection.

1. Введение

Изэнтропическим анализом называется представление метеорологических величин на изэнтропических поверхностях. В качестве вертикальной координаты используется значение потенциальной температуры:

$$\Theta = T (1000/P)^{\kappa},$$

где T – температура воздуха, P – давление, $\kappa = R/C_p = 0.286$, R – газовая постоянная, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

На поверхности с постоянной потенциальной температурой также постоянна и энтропия, которая определяется как $\Phi = c_p \ln \Theta + \text{const}$, поэтому такой способ представления данных называется изэнтропическим анализом.

Способ исследования процессов в атмосфере с помощью изэнтропического анализа известен с 30-х годов прошлого века. Однако, в силу ряда причин, этот способ не применялся так широко, как анализ метеорологических параметров на стандартных изобарических поверхностях. Основная трудность применения изэнтропического анализа состоит в том, что наклон изэнтропических поверхностей к горизонтالي примерно в 30 раз превосходит наклон изобарических поверхностей [3]. Поверхность Земли нельзя считать изэнтропической даже приближенно. Изготовление карт изэнтропического анализа было практически невозможно без быстродействующих компьютеров, кроме того, для выбора нужной изэнтропической поверхности, высота которой меняется в зависимости от времени года и широты, требовалось организовать

удобный интерфейс с пользователем. Поэтому, только в 90-х годах прошлого века, с созданием персональных компьютеров появились первые приложения для метеорологов, позволяющие оперативно рассчитывать метеорологические параметры на изэнтропических поверхностях. Этот возврат к давно известному, но практически не применяемому способу представления метеорологических данных произошел из-за того, что использование изэнтропического анализа и приложений, основанных на расчете потенциального вихря, позволяет исследовать атмосферные процессы различной природы более детально, по сравнению с традиционными методами. Главным преимуществом изэнтропического анализа является возможность учета трехмерности атмосферных процессов. При соблюдении адиабатичности и в отсутствии трения движение воздушных частиц происходит по изэнтропическим траекториям. В средней и верхней тропосфере перемещение частиц можно с определенным приближением считать адиабатическим в течение 1 – 2 суток, поэтому изэнтропические поверхности можно рассматривать как материальные [4]. Проводя траектории на изэнтропической поверхности, можно следить за перемещением индивидуальных частиц. Разность давлений в начальной и конечной точках траекторий показывает изменение давления в индивидуальной частице, а это - вертикальное смещение частицы. Такой способ расчета вертикальных скоростей является наиболее надежным, в сравнении с другими ныне существующими способами [4]. Отслеживание перемещения потоков влаги по изэнтропическим траекториям дает более точную и непрерывную картину, по сравнению с традиционным изобарическим анализом [9], следовательно, изэнтропический анализ лучше подходит для краткосрочного прогноза осадков. Изэнтропические карты потенциального вихря обладают хорошей разрешающей способностью, на них четко прослеживается роль горизонтальной адвекции воздушных масс в формировании особенностей погоды. Потенциальный вихрь на изэнтропических поверхностях ведет себя как квазилагранжева характеристика, поэтому эти карты являются идеальным подспорьем для “классического синоптика”, привыкшего мыслить в терминах процессов трансформации индивидуальных воздушных масс [3].

2. Изэнтропический анализ в технологии ГИС Метео.

Технология ГИС Метео была специально разработана для оперативной работы дежурных синоптиков. С помощью этой технологии можно автоматически изготавливать различные метеорологические карты, используя как фактические, так и любые прогностические данные, если они оформлены в соответствии с форматом Всемирной метеорологической организации [1]. Для реализации изэнтропического анализа был создан модуль пересчета данных из изобарических координат в изэнтропические, а также интерфейс работы с пользователем. Программное средство позволяет в режиме диалога или автоматически, по расписанию, рассчитать на любой изэнтропической поверхности, используя в качестве входной информации данные всевозможных гидродинамических моделей, различные метеорологические параметры:

- давление, влажность, геопотенциал, скорость и направление ветра;
- меру статической устойчивости, которая обратно пропорциональна толщине слоя между двумя изэнтропическими поверхностями $\Delta P = P_n - P_v$, где P – давление на уровне изэнтропической поверхности, индексы означают верхний и нижний уровень соответственно;
- разность между давлением на изэнтропической поверхности и уровнем конденсации: $\Delta P = P - P_c$, где $P_c = P (T_c / T)^{C_p/R_d}$, P – давление на изэнтропической поверхности, T – температура на этом уровне, T_c – температура на уровне конденсации, C_p – теплоемкость при постоянном давлении, R_d – газовая постоянная. Сочетание на карте изолиний ΔP и

значений вертикальных скоростей представляет очень наглядную картину для краткосрочного прогноза осадков;

- абсолютный вихрь: $\Omega_a = \Omega + f$, где Ω - относительный вихрь $\Omega = \partial v_0 / \partial x - \partial u_0 / \partial y$, u_0 , v_0 - составляющие скорости вдоль осей X , Y на изэнтропической поверхности, f - планетарный вихрь, описываемый параметром Кориолиса: $f = 2\omega \sin \varphi$, где ω - угловая скорость вращения Земли, φ - широта места;
- потенциальный вихрь: $PV = \Omega_a (-g \partial \Theta / \partial P)$, где g - гравитационная постоянная, Θ - потенциальная температура;
- эквивалентно-потенциальный вихрь: $EPV = \Omega_a (-g \partial \Theta_e / \partial P)$, где Θ_e - эквивалентно-потенциальная температура;
- влажно-потенциальный вихрь: $MPV = \Omega_a (-g \partial \Theta_{es} / \partial P)$, где Θ_{es} - эквивалентно-потенциальная температура в состоянии насыщения;
- вертикальные скорости, которые рассчитываются как разность давлений начальной и конечной точек траекторий, лежащих на одной изэнтропической поверхности.

Кроме того, производится расчет на уровнях равного значения потенциального вихря следующих параметров: потенциальной температуры, геопотенциала, давления, абсолютного вихря.

Созданное программное средство позволяет наносить перечисленные выше элементы в виде изолиний, цветного поля или значений в узлах сетки на карту, представляющую из себя любую часть территории Земного шара.

3. Исследование случая неожиданно сильного снегопада 7 декабря 2009 г. в Московском регионе

7 декабря 2009 года в Москве и области на фоне высокого давления прогнозировалась погода без существенных осадков. Результаты расчета гидродинамических моделей при прогнозе на 24 ч. давали небольшие осадки, которые в пересчете на сутки составили: модель NCEP Washington – около 1 мм, модель UKMO Exeter – 2.6 мм. Фактические осадки за сутки 7 декабря в Москве составили: на метеорологической станции 27619 (Тушино) - 11 мм осадков, на станции 27612 (ВДНХ) – 8 мм. Сильный снегопад начался около 10 ч МСК и продолжался до полуночи. Метеорологическая карта за 12 ч. МСВ 7 декабря 2009 г. представлена на Рис. 1. На карте проведены изобары на уровне моря по данным станций наблюдений, а также осадки, выпавшие за сутки с 03 ч. МСВ 7 декабря – в виде цифр. Кроме того, на этой же карте нанесены прогностические изогипсы H500 по данным UKMO Exeter на 12 ч. МСВ 7 декабря 2009 г. Анализ этих карт показал, что над Московским регионом формируется небольшая высотная депрессия, однако гораздо лучше это видно по картам изэнтропического анализа. Согласно [3], изэнтропические карты потенциального вихря адекватны картам барической топографии, но более информативны за счет вклада статической устойчивости в поле потенциального вихря, что отражает связь метеорологических процессов, происходящих на различных уровнях. На Рис. 2 представлен прогноз на 24 ч. давления на уровне потенциального вихря равном 2 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ К кг}^{-1}$), в виде изолиний и значения эквивалентно-потенциального вихря на уровне 285°K, в виде заштрихованной зоны, рассчитанных по данным UKMO Exeter за 12 ч. МСВ 6 декабря 2009 г. Изолинии давления на уровне $PV = 2$ представляют собой карту динамической тропопаузы, по которой видно, что над Московским регионом образовалась аномалия потенциального вихря. Другими словами, произошло вторжение стратосферного вихря в верхние слои тропосферы. Значение потенциального вихря равного 2 PVU в районе Москвы находилось на уровне 350 – 400 гПа.

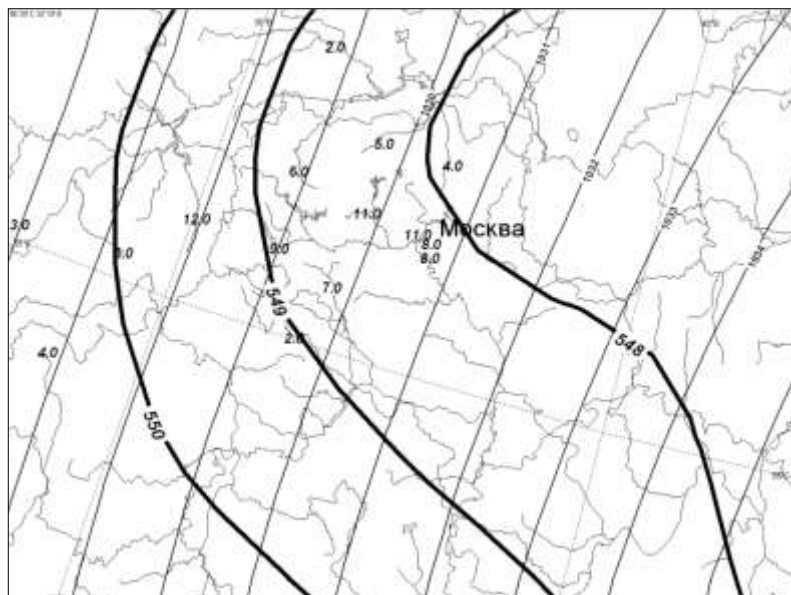


Рис.1. Поле давления на уровне моря (гПа; тонкие линии) и геопотенциала H500 (dam; жирные линии) на 12 ч ВСВ 7 декабря 2009 г. и суточных сумм осадков (мм; указаны цифрами у станций).

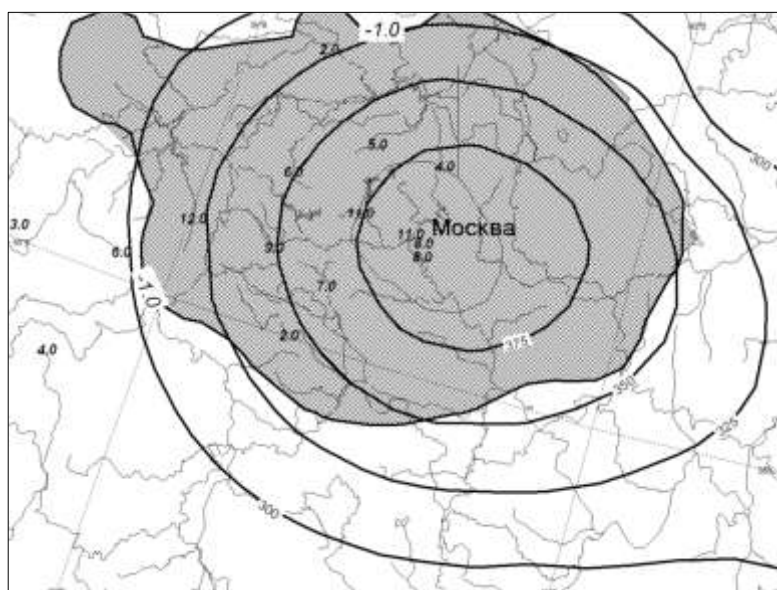


Рис.2. Прогноз на 24 ч по данным УКМО за 12 ч ВСВ 6 декабря 2009 г. поля давления (гПа; изолинии) на поверхности потенциального вихря 2 рву и эквивалентно-потенциального вихря на поверхности 285 К (область отрицательных значений заштрихована).

Согласно [8], стратосферный вихрь, вторгаясь в верхние слои тропосферы, передает туда часть своей энергии. При слабой устойчивости в тропосфере это возмущение, вызванное стратосферным вихрем, может достичь нижних слоев тропосферы. Вихрь имеет циклоническую направленность, следовательно, в нижних слоях тропосферы также создается циклоническое вращение, в результате которого возникают вертикальные скорости, направленные вверх, приводящие к осадкам, при наличии в нижних слоях тропосферы близкого к насыщению воздуха.

На Рис. 3 представлены: изолинии давления поверхности потенциальной температуры, равной 285°K (это поверхность 900 – 800 гПа). Видно, что эта изэнтропическая

поверхность имеет сильный наклон (на западе давление составляет 925 гПа, на востоке 825 гПа). Кроме того, на Рис. 3 представлены значения ветра на поверхности 285°К и закрашенная зона, представляющая собой значения в узлах сетки, где отклонение давления от уровня конденсации составляет менее 25 гПа.

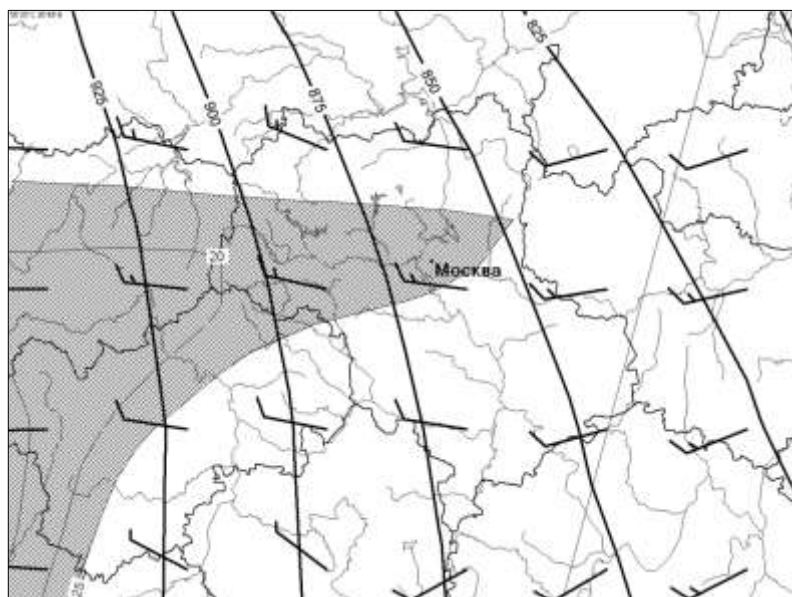


Рис. 3. Изэнтропический анализ поверхности 285 К. Изолинии - давление (гПа), значками показаны скорость и направление ветра. Закрашена область, где отклонение давления от уровня конденсации меньше 25 гПа.

Вертикальная скорость в районе Москвы 7 декабря 2009 г.

Изобарическая поверхность, гПа	ω (Δq) гПа/12 ч по методике [2]	ω (Δq) гПа/12 ч по данным изэнтропического анализа
850	+15.5 (-)	-50.4 (1.5)
700	-25.6 (0.3)	-49.2 (1.3)
500	-43.0 (0.2)	-85.8 (0.5)
осадки за 12 ч. (мм)	0.74	5.09

Примечание. В скобках приведены изменения массовой доли водяного пара в насыщенном воздухе

Очевидно, что воздушные частицы, двигаясь по направлению ветра, будут подниматься. Значения вертикальных скоростей в районе Москвы приведены в Таблице 1. При превышении уровня конденсации, образовавшаяся влага выпадает в виде осадков. Можно посчитать количество осадков за 12 ч. пользуясь известной формулой для расчета обложных осадков [5]:

$$Q = 1.5 \Delta q_{850} + 1.8 \Delta q_{700} + \Delta q_{500},$$

где Δq – индивидуальные изменения массовой доли водяного пара в насыщенном воздухе при подъеме с соответствующих изобарических поверхностей. В этой же

таблице приведены значения вертикальных скоростей, рассчитанных по методике, изложенной в [2]. По этой методике вертикальная скорость рассчитывается по уравнению притока тепла с независимым добавлением вклада эффекта трения в пограничном слое. Рядом с вертикальными скоростями в таблице приведены в скобках соответствующие значения Δq . Сравнение значений количества осадков, определенных с использованием разных методов расчета вертикальных скоростей, подтвердило утверждение [4], что вертикальные скорости с использованием изэнтропического анализа определяются точнее. Однако количество рассчитанных осадков все равно оказалось значительно меньше фактических осадков, зафиксированных на станции 27612. Снегопад 7 декабря 2009 г. имел явный конвективный характер, поэтому было проведено исследование неустойчивости в тропосфере. Проверка конвективной неустойчивости показала, что слои в нижней тропосфере устойчивы, то есть кривая состояния на всех уровнях лежит левее кривой стратификации, энергия неустойчивости отрицательная, перемещение частицы вверх по вертикали затруднено. Дальнейшее исследование показало присутствие условной симметричной неустойчивости [7] над Московским регионом на уровнях 1000 – 700 гПа, благодаря которой произошло развитие влажной наклонной конвекции. Этот вид неустойчивости хорошо прогнозируется с помощью расчета эквивалентно-потенциального вихря (EPV) или влажно-потенциального вихря (MPV). Согласно [7], при $EPV < 0$ или $MPV < 0.25$, а также при значении влажности, превышающей 80% в соответствующих слоях, следует ожидать развития условной симметричной неустойчивости или влажной наклонной конвекции. На Рис. 2 представлена заштрихованная зона – область отрицательных значений эквивалентно-потенциального вихря на уровне 285°K. Можно определить дополнительное количество осадков, вызванное влажной наклонной конвекцией. Конвективную вертикальную скорость можно вычислить, зная доступную потенциальную энергию наклонной конвекции (SCAPE):

$$\omega_c = \sqrt{SCAPE}$$

Для определения SCAPE воспользуемся [6]. В этой работе выводится, что SCAPE состоит из двух частей. Первая – обычная энергия неустойчивости (CAPE), которая определяется, по аэрологической диаграмме, как площадь, находящаяся между кривыми состояния и стратификации в соответствующих слоях. Вторая часть – связана с работой центробежных сил. В [6] предлагается вычислять температурную добавку:

$$\frac{T_v \cdot f}{2 \cdot g \cdot \Omega_a} \cdot \frac{d[(v - v_0)^2]}{dz},$$

где T_v – средняя виртуальная температура в слое, f – параметр Кориолиса, v и v_0 – скорости ветра на верхней и нижней границе слоя, g – ускорение свободного падения, Ω_a – абсолютный вихрь, z – высота. Далее предлагается прибавлять эту добавку к температуре поднимающейся частицы и вычислять энергию неустойчивости обычным способом [6]. Примерный расчет для слоя 925 – 850 гПа:

$$\Delta T_{925-850} = 264.4 \cdot (12 - 2)^2 / (2 \cdot 9.8 \cdot 650) = 2.03$$

Энергия неустойчивости с учетом добавки в 2.03 градуса на уровне 850 гПа составила 76 Дж кг⁻¹. Значение средней конвективной вертикальной скорости (ω_k) составило 8.71 м/с. Для расчета интенсивности ливневых осадков необходимо найти среднюю вертикальную скорость в кучево-дождевом облаке по следующей эмпирической формуле [5]:

$$\omega = 0.33 \cdot 10^{-4} (m \omega_k h),$$

где m – толщина конвективно-неустойчивого слоя (гПа), h – мощность конвекции (гПа). Подставив в формулу значения $m = 85$, $h = 250$ и $\omega_k = 8.71$, получим: $\omega = 6.1$ см/с = -23.8 гПа/ч. Интенсивность ливневых осадков, согласно [5]:

$$I_d = 1.5 \Delta q_{850} + 3.0 \Delta q_{700} = 1.3 \text{ мм/ч}$$

Согласно [6], временной масштаб для ливневых осадков, вызванных наклонной конвекцией имеет порядок $1/f$ и составляет 2 - 4 часа. Таким образом, количество осадков, вызванное наклонной конвекцией, в районе Москвы составило 4 - 5 мм, а общее количество осадков (конвективных и обложных) – около 9 мм за 12 час. В Таблице 2 представлены рассчитанные значения общего количества осадков для станций Московского региона.

Ввиду вышеизложенного, можно сделать следующие выводы о причинах сильных осадков 7 декабря 2009 г. в Московском регионе:

- произошло вторжение стратосферного воздуха в верхние слои тропосферы, что было диагностировано образованием положительной аномалии потенциального вихря над Московским регионом;
- в результате этого воздействия возникло циклоническое вращение в нижней тропосфере, произошло развитие отрицательных вертикальных скоростей, что вызвало появление осадков;
- резкое усиление осадков произошло из-за влажной наклонной конвекции, которая стала возможной благодаря наличию условной симметричной неустойчивости в нижней тропосфере, что было подтверждено образованием отрицательной аномалии эквивалентно-потенциального вихря, а также тем, что в нижних слоях тропосферы влажность воздуха в среднем была более 80%.

Заключение

В статье представлено программное средство, позволяющее оперативно создавать карты изэнтропического анализа, рассчитывать значения таких параметров, как потенциальный, эквивалентно-потенциальный и влажно-потенциальный вихри. На примере конкретного случая – неожиданно сильного снегопада, прошедшего в Московском регионе 7 декабря 2009 г. - продемонстрирована техника применения указанного программного средства для исследования атмосферных явлений и составления прогноза погоды. Представленное программное средство не заменяет традиционный (изобарический) способ исследования явлений погоды, но может существенно дополнить его, позволяя по-другому посмотреть на процессы, происходящие в атмосфере и в итоге помочь синоптику в составлении правильного прогноза. Согласно [8], ведущие метеорологи в настоящее время обсуждают не сам факт необходимости изэнтропического анализа, а возможность сделать этот способ исследования атмосферных процессов удобным для использования в оперативной работе синоптиков. В качестве направления дальнейших исследований предполагается создание в технологии ГИС Метео для автоматизированного рабочего места синоптика модуля для расчета осадков, вызванных влажной наклонной конвекцией.

Список литературы

1. Акулиничева А. А., Беркович Л. В., Соломахов А. Ю., Шмелькин Ю. Л., Юсупов Ю. И. Геоинформационная система “Метео” и состояние ее использования в метеослужбах России и ближнего зарубежья. – Метеорология и гидрология, 2001, №11, с. 90 – 98.
2. Белоусов С. Л. , Юсупов Ю. И. Расчет трехмерных траекторий воздушных частиц. – Метеорология и гидрология, 1991, №12, с. 41 – 48.
3. Курганский М. В. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1993 г., – 168 с.
4. Шакина Н. П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 263 с.
5. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 424 – 430.
6. Emanuel K. A. On Assessing Local Conditional Symmetric Instability from Atmospheric Soundings. Monthly Weather Review. – 1983, Volume 111: – P. 2016 – 2033.
7. Halkomb C. and Market P. Forcing, instability and equivalent potential vorticity in a Midwest USA convective snowstorm. Meteorol. Appl. – 2003, N 10: – P. 273 – 280.
8. Hoskins B. J., McIntyre M. E & Robertson A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Q.J.R. Meteorol. Soc., – 1985, N 111: – P. 877 – 946.
9. Uccellini L. W. Isentropic analysis for meteorological applications. Proc. 1st Conf. on Isentropic Analysis and Forecasting, Lancaster, 1995.