МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учрежденне высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему: «Возможности и перспективы применения изэнтропического анализа»

Исполнитель Буравцова Елена Вячеславовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)
Топтунова Ольга Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 20 » июня 2024 г.

Санкт–Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО МЕТОДА И ЕГО РАЗВИТИЕ 6

1.1 Термодинамическое состояние атмосферы и свойства изэнтропии 6

1.1.1 Адиабатические процессы и энтропия 8

1.1.2 Изэнтропическое состояние тропосферы земли 10

1.2 История и развитие изэнтропического метода 11

2. СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД НА ИЗЭНТРОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.1 Вертикальная координата потенциальная температура **Error! Bookmark not defined.**

2.2 Вертикальное движение в изэнтропическом пространстве ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.3 Изэнтропическая поверхность ..... **Error! Bookmark not defined.**

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ..... **Error! Bookmark not defined.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 50

СПИСОК ИПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ 52

ВВЕДЕНИЕ

Качество краткосрочных прогнозов тесно связано с пониманием синоптика текущего состояния атмосферы в регионе. В настоящее время исследования атмосферы проводятся по изобарическим картам. Они активно выступают в качестве первичного материала для оценки развития синоптических процессов, с последующим дополнением метеорологических данных. Однако, анализ данных, полученный по изэнтропическим картам, может дать иное представление о текущем состоянии атмосферы и улучшить качество оценки синоптиками погодных условий. Это возможно благодаря тому, что анализ изэнтропических поверхностей по нескольким картам дает больше полезной информации по сравнению с таким же количеством карт, созданных по изобарическим поверхностям. При этом в настоящее время изэнтропический метод анализа не может заменить существующие способы прогноза. Это связано с отсутствием адекватных методов оценки, которые можно применить в практической деятельности синоптика.

Это и определяет актуальность исследования.

Цель работы: познакомиться с изэнтропическим методом анализа, и реализовать его возможности в исследовании атмосферы. Работа включает в себя введение, три главы и заключение. В первой главе изложены теоретические основы изэнтропического метода, во второй – современный взгляд на изэнтропический анализ, третья глава раскрывает вопрос о взаимодействии тропосферы и стратосферы с помощью изэнтропического метода.

Поскольку подробные изэнтропические карты в настоящее время недоступны на оперативной основе, то в качестве рабочего материала в

практической части дипломной работы были построены самостоятельно. В ходе анализа они продемонстрируют, что оперативный метод создания изэнтропических карт может быть использован для диагностики взаимодействий в слоях тропосферы, которые отвечают за важные погодные характеристики, и поведение в толще тропопаузы.

Задачи:

1. Научиться пользоваться инструментом для построения изэнтропических карт, реализованным на базе лаборатории гидродинамического моделирования, адаптировать его к своим исходным данным
2. Проанализировать синоптические ситуации для выявления аномалий.
3. Провести синоптический анализ по современным методам прогноза крупномасштабных процессов атмосферы и сделать выводы.

Результатом данной работы будет являться оценка возможностей изэнтропического анализа, путем выявления крупномасштабных процессов, влияющих в последующем на прогноз.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО МЕТОДА И ЕГО РАЗВИТИЕ

1.1 Термодинамическое состояние атмосферы и свойства изэнтропии

Атмосфера представляет собой среду, в которой постоянно наблюдется переход одних видов энергии в другие. Существует несколько процессов, посредством которых происходит упомянутая передача энергии, и эти различные процессы называются термодинамическими. Они же служат для описания и объяснения таких явлений, как свойства влажного воздуха, образование облаков, конвекции, вертикальной неустойчивости в атмосфере. Синоптические карты используются как инструменты при прогнозировании развития синоптических объектов. Термодинамика атмосферы формирует основу для микрофизики облаков и параметризации конвекции, используемых в численных моделях погоды.

В термодинамике атмосферы наиболее широко используются выводы, вытекающие из первого начала термодинамики, устанавливающие связь между теплотой, работой и изменением внутренней энергии тел. Второе начало термодинамики устанавливает направление самопроизвольных процессов в природе и условия осуществления процессов приращения теплоты в работу.

Объектами термодинамических процессов выступают физические тела, которые называются системами. Состояние термодинамической системы, которое называют тепловым, характеризуют равновесным давлением p, которое обусловлено воздействием окружающих тел, массой системы m, ее объемом V и температурой t. Величины p, V, t называют параметрами системы. Таким

образом, температура есть один из параметров, определяющих тепловое состояние тела.

Система, все части которой обладают одинаковыми свойствами, называется однородной. Однородные части термодинамической системы часто называют фазой, при этом в соответствии с различными видами агрегатного состояния вещества различают газообразные, жидкие и твердые (кристаллические) фазы.

Если термодинамическая система не может обмениваться теплотой с другими телами, то ее называют теплоизолированной или адиабатически изолированной.

Если изменения в термодинамической системе не связаны с ее механическим взаимодействием с окружающими телами, то такую систему называют механически изолированной. Если состояние термодинамической системы не меняется с течением времени при одинаковой температуре во всех ее частях, то говорят, что система находится в равновесном состоянии или в термодинамическом равновесии. В условиях равновесного состояния в системе отсутствуют какие-либо процессы переноса массы и энергии.

Из повседневных наблюдений следует, что если взять любую систему, с которой можно производить опыты, и изолировать ее от посторонних воздействий, то в ней с течением времени установится термодинамическое равновесие. На основании такого рода обобщений в учение о тепловых процессах введена первая аксиома, называемая нулевым началом термодинамики: изолированная система с течением временем происходит в равновесное состояние, при котором в ней всюду будет одна и та же температура и из которого система не может самопроизвольно выйти.

Равновесные процессы — это идеализированные процессы, их описание значительно проще, нежели неравновесных. Изучение таких процессов очень важно, так как многие их характеристики являются предельными для реальных процессов, протекающих конечными скоростями.

Обратимым термодинамическим процессом называется процесс, допускающий возможность возвращения системы в первоначальное состояние без того, чтобы в окружающей среде осталась какие-либо изменения. Обратимым может быть лишь равновесный процесс, так как при равновесном процессе система проходит непрерывную последовательность состояний, бесконечно мало отличающихся друг от друга.

1.1.1 Адиабатические процессы и энтропия

Любой произвольный равновесный цикл можно разбить на совокупность ряда элементарных циклов Карно. Интеграл вида, где:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \qquad (1)$$

является обобщенной характеристикой обратимых циклов независимо от их формы и свойств рабочего вещества.

Из математического анализа известно, что если линейный интеграл вида (1), то подынтегральное выражение должно быть полным дифференциалом некоторой функции. Таким образом, интеграл (1) показывает, что для обратимого процесса элементарная приведенная теплота $\frac{dQ}{T}$ является полным дифференциалом некоторой функции S системы, которую ввел Клаузиус (1866 г.) и назвал энтропией:

$$\frac{dQ}{T} = dS. \qquad (2)$$

Смысл энтропии как функции состояния делается более понятным, если интеграл (1) переписать с учетом (2):

$$\oint dS = 0. \qquad (3)$$

Как и внутренняя энергия, энтропия есть функция параметров системы p, T, V; и так как последняя взаимосвязаны: f (p, V, T) = 0, то энтропия может быть представлена тремя зависимостями:

$$S = S\,(T, V),$$

$$S = S\,(T, p),$$

$$S = S\,(p, V),$$

Энтропия имеет размерность теплоемкости [7]. Наиболее четкое определение энтропии (в рамках термодинамики) дается следующая формулировка: энтропия есть такая функция состояния системы, дифференциал которой связан с элементарным тепловым эффектом в обратном процессе соотношением:

$$dQ = TdS.$$

Как известно, кипение и отвердевание жидкостей происходит при постоянных температурах, при этом агрегатные (фазовые) превращения жидкость – пар или жидкость – твердое состояние происходят с поглощением (выделением) теплоты перехода λ (теплота преобразования и теплота кристаллизации). Указанные фазовые превращения сопровождаются изменением энтропии:

$$\Delta S = \frac{\lambda}{T}, \qquad (4)$$

Среди равновесных процессов существует адиабатические переходы, для которых $\mathrm{dQ} = 0$, и согласно (2)

$$dS = 0,\ \ S = const.$$

Таким образом, адиабатические равновесные процессы протекают при постоянной энтропии систем. А процесс, протекающий при одном неизменном параметре, называется изопроцесс, в данном случае изэнтропический.

1.1.2 Изэнтропическое состояние тропосферы земли

Нулевой закон термодинамики как обобщение лабораторных экспериментов утверждает выравнивание температуры и установление термодинамического равновесия в изолированных системах небольших размеров.

Нижняя часть атмосферы – тропосфера в меньшей степени подвержена действию излучения по сравнению с верхними слоями газовой оболочки Земли. Поэтому в первом грубом приближении тропосферу можно рассматривать как изолированную систему. Условие ее механического равновесия описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dp}{dh} = -pg, \quad (5)$$

где $\frac{dp}{dh}$ – градиент давления, h – высота над уровнем Земли рассматриваемой точки. Предположив, что в тропосфере в тех ее частях, где реализуется механическое равновесие, энтропия постоянная величина (иэнтропическая атмосфера). Тогда

$$C_p lnT - Rlnp = const,\ \ C_p \frac{1}{T}\frac{dT}{dh} - R\frac{1}{p}\frac{dp}{dh} = 0$$

и

$$\frac{dp}{dh} = C_p \frac{p}{RT} \frac{dT}{dh},$$

учитывая, что $\frac{p}{RT} = \frac{1}{V}$ и $V_p = \mu$, из (5) и (6) получится:

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{\mu g}{C_p}. \qquad (7)$$

Взяв μ = 29 г/моль, C_p = 7*4,18*10^7 эрг/(моль*К) и g = 9,81 м/$с^2$, из (7) можно найти:

$$\frac{dT}{dh} = 0{,}98 \frac{К}{м}. \qquad (8)$$

Таким образом, в изэнтропической тропосфере должен существовать устойчивый градиент температуры, определяемый (7). Согласно (8) среднее падение температуры должно быть равным 0,98 К на 100 м. Как правило, в тропосфере имеет место падение температуры с высотой, но оно значительно меньше вычисленного по (7) и составляет 0,65 К/м.

Из выше изложенного следует, что условие изэнтропичности атмосферы лучше отражает действительность, чем условие ее изотермичности.

1.2 История и развитие изэнтропического метода

Метод исследования процессов в атмосфере с помощью изэнтропического анализа известен с 30-х годов прошлого века. В основу этого метода положено рассмотрение распределения потенциальной температуры по высоте. Одним из первых, кто положил начало к применению этого метода, был сэр Нэпир Шоу, когда в Великобритании 1933 года он впервые предложил вариант изэнтропической карты (рис. 1.1).

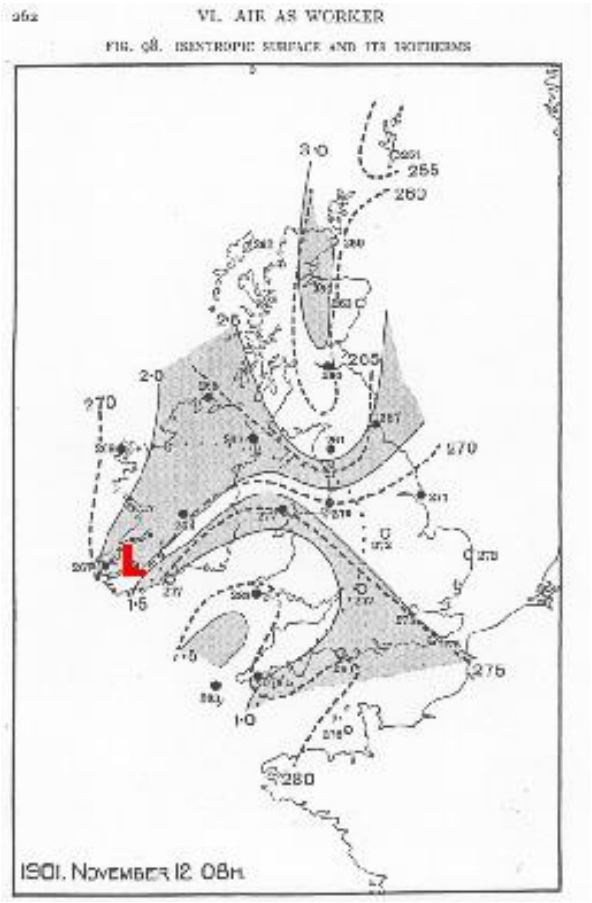

Рисунок 1.1 – Первая представленная миру карта изэнтропического анализа

Использовать ее было непрактично, так как она была получена на основе массива менее чем из 50 станций.

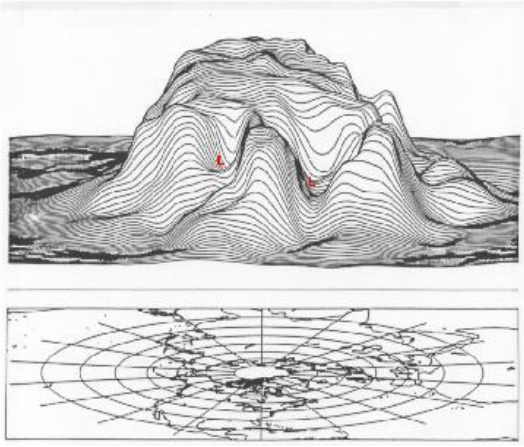

Рисунок 1.2 – «Над миром» и «Под миром».
Пространственная схема изэнтропической поверхности 313К

Но уже в 1936 году Карл-Густав Росби представил новый вид карты (рис. 1.2). Она стала более информативной и имела пространственные ограничения, в связи с расширением сети метеостанций, и включением в их программу аэрологических наблюдений. Карл Густав Арвид Росби, а в последующем и его коллеги, систематически использовали изэнтропические карты (рис. 1.3) для отображения движения атмосферы и признали их силу в объяснении Лагранжевой структуры воздушных масс крупномасштабного потока, учитывая, что адиабатические процессы имели второстепенное значение. Как следствие, исключался фактор, зависящий от условий окружающей среды, таких как облачность, сезон и время суток.

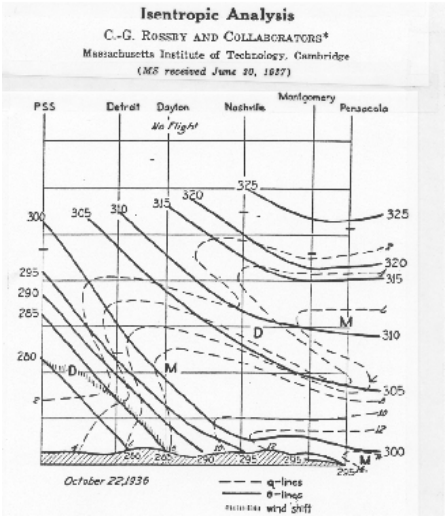

Рисунок 1.3 – Поперечное сечение, Св. Сент. Мариф, Пенсакола, 23 октября 1936
Карта изэнтропического анализа Росби, К. Г.

Однако упоминание изоэнтропийной координаты как ценного диагностического инструмента был ограничен относительно небольшой группой метеорологов-исследователей. Специалисты по оперативной метеорологии стали игнорировать изоэнтропическую структуру с сороковых годов, когда авиация и Вторая мировая война внесли свои коррективы. Вследствие этого в качестве вертикальной координаты было выбрано давление (рис. 1.4).

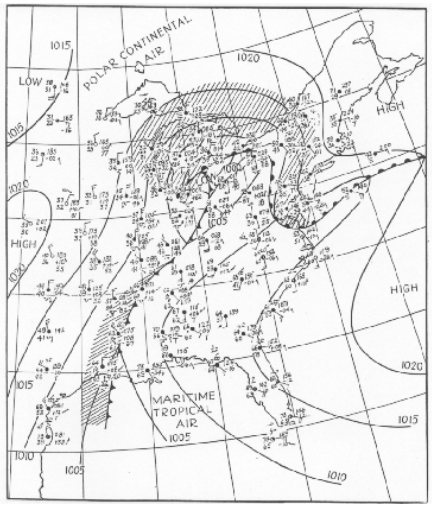

Рисунок 1.4 – Карта погоды, 1940 (Байерс)

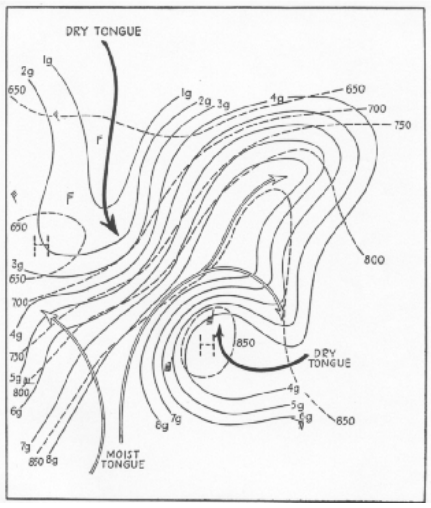

Рисунок 1.5 – Изэнтропическая карта, 18 апреля 1940 г. Пунктирные линии указывают атмосферное давление на изэнтропической поверхности (иэнтропическая поверхность высока там, где давление низкое, и наборот). Сплошные линии представляют удельную влажность, выраженную в граммах. Черные стрелки – язык влажного воздуха, светлые - язык сухого

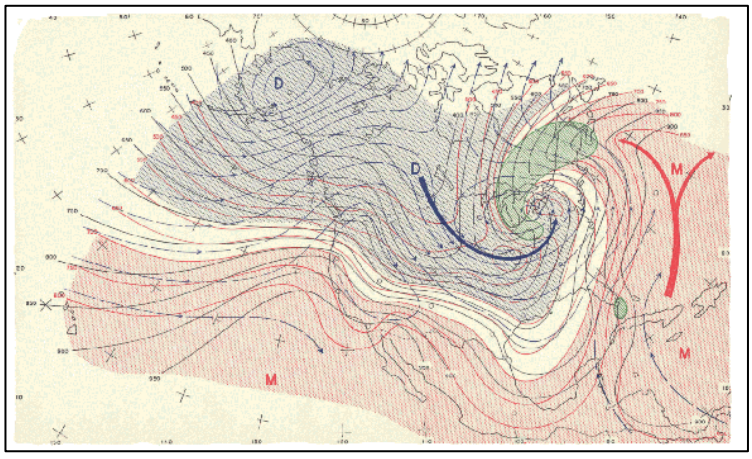

Рисунок 1.6 – Основные принципы прогнозирования по изэнтропической поверхности 302 К, Старр В.П. 1942 г

Таким образом, в дальнейшем изэнтропическое пространство стало оцениваться оперативным путем интерполяции давления на изэнтропическую поверхность (рис. 1.5, 1.6).

С течением времени большой научный интерес к использованию изэнтропического метода в синоптическом анализе с помощью карт стал узконаправленным. Его оперативное использование вскоре прекратилось, поскольку изготовление карт изэнтропического анализа было практически невозможно без быстродействующих компьютеров. 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 изэнтропические поверхности.

Не предлагаются печати страницы с 16 по 49.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная тема диплома направлена на широкое применение в области прогнозирования, однако в работе был достаточно кратко рассмотрен изэнтропический анализ и его алгоритм, реализованный в лаборатории гидродинамического моделирования, созданной на базе кафедры метеорологичских прогнозов в РГГМУ. Но это не помешало достичь поставленной цели, и показать его преимущества на фоне современных методов прогноза.

Эффективность изэнтропического метода демонстрировалась путем исследования развития циклогенеза над территорией Москвы 30 октября 2022 г. В ходе работы было выявлено, что возмущения в верхней и средней тропосфере образуют активные конвективные процессы с явным складыванием тропопаузы. Не исключаются и возникающие вопросы, которые определенным образом повлияли на работу. По ним можно сделать следующие выводы:

1) выбор подходящей изэнтропической поверхности для анализа зависит от сезона, широты и времени суток. Данный метод не предполагает фиксированных уровней, как в изобарическом методе.

2) изэнтропические поверхности, как правило, проходят параллельно фронтальным разделам, что создает сложность в их обнаружении.

3) отсутствие оперативного материала.

Создается некоторая трудность в использовании изэнтропического метода для прогнозирования, однако появление такого параметра как вихрь Эртеля дает возможность лучше описать и выявить быстро развивающиеся циклоны. Так же удачно выступает мерой устойчивости расстояние по вертикали изэнтропических поверхностей и обозначение фронтальных разделов. Этап сравнения между собой результатов по двум анализам показал насколько дополняют друг друга изобарический и изэнтропический метод.

Поэтому следует отметить, что применение возможно, помимо научной области, и в оперативной работе синоптика.

Изэнтропический анализ не сможет стать конкурентом или заменой современным методикам, но в оперативной работе использование изэнтропических карт поможет лучше понимать синоптические процессы и составлять прогнозы.

СПИСОК ИПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гечайте, А.И. Погорельцев, А.И. Угрюмов «Волновое взаимодействие стратосфера–тропосфера Как предвестник аномальных похолоданий В восточной части балтийского региона» // Ученые записки № 43, 2016, стр. 129-139.

2. Гущина Д.Ю. Синоптическая метеорология. Анализ метеорологических полей: учебное пособие / Д. Ю. Гущина; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. - Москва : Географический фак. МГУ, 2014. - 119, [1] с.: ил., табл.; 21 см.

3. Иванова А.Р. Динамика внетропической тропопаузы Северного полушария: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 25.00.30 – Москва, 2011 – 38 с.

4. Лыкосов В.Н. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы: учеб. пособие / В.Н. Лыкосов и др. Предис: В.А. Садовничий. – М.: Издательство Московского университета, 2012. – 408 с., илл. – (Серия «Компьютерное образование»).

5. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии: Физика атмосферы. Для гидрометеорол. ин-тов и ун-тов / Л. Т. Матвеев. – М: Ленинград: Гидрометеоиздат, 1976. - 639 с.

6. Угрюмов А.И., Лаврова И.В. Основные закономерности общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / А.И. Угрюмов, И.В. Лаврова. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2021. – 72 с.

7. Юсупов, Ю. Использование изэнтропического анализа в оперативном краткосрочном прогнозе погоды / Ю. Юсупов // Метеорология и гидрология .— 2012. — №1. — С. 42-49. — URL: https://rucont.ru/efd/334213.

8. Яковлев В. Ф. Курс физики. Теплота и молекулярная физика. Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. М., «Просвещение», 1976. - 320 с.

9. Arakawa A., Mechoso C. R., Konor C. S An Isentropic Vertical Coordinate Model: Design and Application to Atmospheric Frontogenesis Studies // Meteorology and Atmospheric 50, 31-45, 1992.

10. Fakhruzzaman K. M., Fishman J., Brackett V. G. Large-scale circulation patterns associated with high concentrations of tropospheric ozone in the tropical South Atlantic Ocean // Atmospheric Sciences Division (Mail Stop 401A) NASA Langley Research Center Hampton, Virginia 23681-0001, 1994.

11. Holopainen E.O., rontu L. On shear lines in the upper troposphere over Europe, Department of Meteorology, University of Helsinki, Hallituskatu 11-13, SF-00100 Helsinki 10, Finland, 1980.

12. 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.

13. Jadin E.A. Stratospheric «wave hole» and interannual variations of the stratospheric circulation in late winter // Natural Science, 2011, vol. 3, no. 4, pp. 259–267.

14. Isentropic analysis / Truett, Scott C., Central Region Technical attachment; 87-4,

URL: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/33757/noaa_33757_DS1.pdf.

15. Synoptic Meteorology / Lehkonen A., EUMeTrain Ed, URL: https://resources.eumetrain.org/satmanu/index_user.html.

16. Market, P.S., J.T. Moore, and S.M. Rochette On calculating vertical motions in isentropic space. Natl. Wea. Dig., 24, 2000, 31-37.

17. Moore, J. T. Isentropic Analysis and Interpretation: Operational Applications to Synoptic and Mesoscale ForecastrProblems. National Weather Service Training Center, Kansas City, MO, 1993, 99 pp.

18. The use and interpretation of isentropic analyses / Anderson, Jeffrey Lowe, NOAA technical memorandum NWS WR; 188, URL: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/14453/noaa_14453_DS1.pdf.

19. Uccelini L. W. Isentropic analysis for meteorological applications. // Proc. 1st Conf. on Isentropic Analysis and Forecasting – Lancaster, 1995.

20. Uccellini L. Operational Diagnostic Applications of Isentropic Analysis // National Weather Digest, 1976, vol. 1, no. 1.

21. Zyulyaeva Yu.A., Zhadin E.A. Analysis of Three-dimensional Eliassen-Palm Fluxes in the Lower Stratosphere // Russian Meteorology and Hydrology, 2009, vol. 34, no. 8, pp. 483–490.

22. EUMeTrain: официальный сайт. – Вена – URL: http://resources.eumetrain.org/ePort_MapViewer/index.html (дата обращения: 12.06.2024).

23. Ventusky: официальный сайт. – Kotíkovska, Пльзень – URL: https://www.ventusky.com/?p=54;19;2&l=pressure (дата обращения: 12.06.2024).

24. NWC SAF: официальный сайт – URL: https://www.nwcsaf.org/web/guest/nec/geo-geostationary-archive (дата обращения: 12.06.2024).