

УДК 551.501+551.509+[551.594:551.596]

Гусейнов Н.Ш.¹, Шпиг В.М.², Меликов Б.М.³

¹Національна академія авіації Азербайджану

²Український гідрометеорологічний інститут

³Авіаційний метеорологічний центр УВД «Азераеронавігація»

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГРОЗ**

Ключевые слова: прогноз; метод; гроза

Вступление. Как известно кучево-дождевые облака, сопровождающиеся такими метеорологическими явлениями, как грозы, ливневые осадки, турбулентность, сдвиг ветра и др. создают наиболее опасные условия для полетов, что обуславливает актуальность исследования условий их формирования, разработки точных методов прогнозирования.

С целью выявления объективности применения того или иного прогностического метода, в статье рассмотрены базовые принципы разработки расчетных методов, прогностических параметров и индексов, используемых в прогнозировании гроз. Для упрощения анализа основные прогностические параметры рассмотрены в схеме классификации, с учетом их лимитных значений, определяющих, диагностирование интенсивности конвективных процессов в атмосфере.

Как в оперативном прогнозировании, так и при исследовании гроз метеорологи ссылаются на прогностические параметры, например, такие как, потенциальная энергия неустойчиво стратифицированной атмосферы (CAPE) или композитный параметр формирования суперячейковых гроз (supercell composite parametr) и т.д. В последние годы учеными изучаются вопросы, связанные с определением степени приемлемости тех или иных прогностических параметров в прогнозировании грозовой деятельности в атмосфере. Довольно обширные исследования в этой области принадлежат ученым из Оклахомского Университета и Института Мезомасштабных Метеорологических Исследований Чарльзу Досвелу и Дэвиду Шульцу, которые в своих работах [3, 4] характеризуют прогностические параметры, посредством диагностических параметров, составляющих основу расчета прогностических параметров. Согласно Досвелу и Дэвиду Шульцу внедрение прогностических параметров прогнозирования гроз десятилетиями, не является доказательным фактором надежности прогностических параметров, так как для большинства используемых диагностических параметров не произведена верификация их критериальных значений.

Также низкая оправдываемость прогностических параметров обуславливается рядом причин неверного расчета параметрических значений диагностических параметров, использованием их не по назначению и пр.

Очевидно, что значимость прогностического параметра зависит от того, насколько больше диагностических параметров, характеризующих состояние условий неустойчивой стратификации атмосферы он комплексно охватывает.

Таким образом возникает необходимость систематизации существующих прогностических параметров, с целью всестороннего анализа факторов влияющих на эффективность их применения в прогнозировании гроз. Одной из таких схем может послужить классификация, учитывающая методы расчетов диагностических параметров, выполненная для выявления характеристик прогностических параметров и лимитов их пригодности в прогнозировании гроз.

Диагностическими параметрами могут послужить измеряемые метеорологические элементы (температура, влажность, атмосферное давление и т.д.) или метеорологические величины, вычисляемые из основных метеорологических элементов. Согласно Досвелу [3] взаимосвязь между диагнозом и прогнозом может быть определена нижеследующим математическим выражением. Пусть Φ выражает n-разрядную векторную величину состояния атмосферы (1)

$$\Phi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n). \quad (1)$$

Этот вектор является функцией выраженной из пространственного вектора X известного во времени $t=t_0$, таким образом:

$$\Phi = \Phi(X, t=t_0) = \Phi_0. \quad (2)$$

Согласно основному принципу численного метода прогнозирования, информация о начальном состоянии атмосферы используется для прогнозирования его состояния в будущем, которое выражается следующим уравнением (3):

$$\Phi(X, t = t_0 + \delta t) = \Phi(X, t = t_0) + \delta t \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{t=t_0}. \quad (3)$$

Таким образом, состояние атмосферы в будущем рассчитывается как сумма его начального состояния и его изменения во времени δt (4)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}(X, t) = f[\Phi(X, t)]. \quad (4)$$

Это своего рода тренд параметров состояния атмосферы, являющийся функцией их текущего пространственного распределения (поля метеорологических элементов). В расчетных прогнозах тренд выражается системой уравнений используемых для численной модели.

Одним из важных условий для достижения высокой оправдываемости прогноза является относительно устойчивая (продолжительная) корреляция между расчетным параметром и прогнозируемыми условиями. Очевидно что, диагностические переменные со временем меняются, и определение тенденции изменения одной диагностической переменной может послужить в свою очередь надлежащим прогностическим параметром. Согласно

вышесказанному, со временем тенденция точности прогноза использующего прогностические параметры снижается.

Для изучения вопросов ограничивающих использование диагностических параметров предлагается нижеследующая схема их классификации.

А. Измеряемые параметры – определяемые непосредственно с помощью метеорологических измерителей, например: температура воздуха (T), точка росы (T_d), атмосферное давление (P) и др.

В. Рассчитываемые параметры – определяются с помощью двух или более измеренных величин. Использование этих величин позволяет определить физические свойства характеризуемой атмосферной ситуации. Например, при исследовании конвекции используются такие постоянные параметры, как потенциальная температура (θ), удельная влажность (r), которые рассчитываются с помощью температуры, точки росы и давления.

С. Производные или интегралы (пространственные или временные) измеренных или расчетных параметров – временно-пространственные производные или интегралы измеренных или расчетных параметров формируют следующий класс диагностических параметров. Фактически эти величины позволяют в расчетах выполнить математическое описание атмосферной ситуации. Главным недостатком таких расчетов является ограниченность разрешающей способности во времени и пространстве используемых исходных данных.

Д. Комбинированные параметры – соединение двух и более диагностических параметров; что, эффективно используется для определения специфической атмосферной ситуации. Зоны конвергенции потоков влажности (ЗКВ), детально исследуемые Банакосом и Шульцем [1] является ярким примером использования комбинации диагностических параметров. Формулировка зоны конвергенции влажности может выражаться по-разному, в зависимости от ситуации, но обычно его дифференциальный расчет выражается нижеследующей формулой (5)

$$ЗКВ = -\nabla_h \cdot (rV_h) = \underbrace{r\nabla_h \cdot V_h}_1 + \underbrace{V_h \cdot \nabla_h r}_2 \quad (5)$$

Здесь r удельная влажность, Δ_h оператор градиента, V_h горизонтальный вектор ветра. Эта формула включает как расчетную величину (r), так и пространственную производную наблюдаемой величины (V_h). ЗКВ рассчитывается при наличии данных плотно расположенных наземных станций. Это позволяет определить зоны роста влажности в приземном слое, что используется для прогнозирования сильных гроз [1]. В связи с этим Банакос и Шульц выразили следующую точку зрения:

1. Предполагаемое значение прогностического параметра ЗКВ невозможно определить точно, с помощью сомнительных статистических исследований;
2. ЗКВ является неадекватным параметром, используемым как прогностический инструмент, так как он содержит две из трех компонент характеризующих конвекцию [6]. Этими компонентами

являются влагосодержание и зона дивергенции, которые могут быть включены в данную комбинацию квазисамостоятельно. Ценность параметра ЗКВ определяется тем что, он способствует определению пространственно-временного перекрытия этих компонент.

Е. Индексы – чётко разделяются на два подкласса: индексы, обусловленные физическими процессами, и индексы, определяемые произвольной комбинацией диагностических параметров. Прежде чем перейти к индексам, рассмотрим некоторые вопросы, связанные с диагностическими параметрами, которые обуславливают их полезность для диагноза текущего состояния атмосферы.

Все диагностические параметры в той или иной степени подвержены к погрешностям, которые характеризуются различными факторами. Эти погрешности можно разделить на инструментальные и статистические, связанные с ограниченным числом ряда данных [2]. Такая зависимость диагностических параметров может обуславливать пригодность прогностических параметров, включающих эти параметры для прогнозирования гроз в различных синоптических ситуациях.

Рассмотрим такую зависимость на примере сравнения энергии неустойчивости (CAPE) и индекса Шоуолтера (SI).

Индекс Шоуолтера определяется разницей между рассчитываемой температурой гипотетически поднимающейся частицы с уровня 850 гПа до 500 гПа и фактической температурой частицы находящейся на 500 гПа (6).

$$SI = T_{500} - T_{lp(850 \text{ hPa})}, \quad (6)$$

Здесь *SI* – индекс Шоуолтера, *T* – температура на соответствующем уровне, *lp* – индекс, обозначающий поднимающуюся частицу.

Часто указанный метод приводит к ошибочному прогнозу, как в случае, соответствующей ситуации определенной аэрологической диаграммой приведенной на рис. 1. В данном случае влажность убывает стремительно лишь ниже уровня 850 гПа, и несмотря на то, что результат расчета индекса Шоуолтера выполняется безошибочно, импликация в развитии конвекции может привести к неверной интерпретации данной синоптической ситуации.

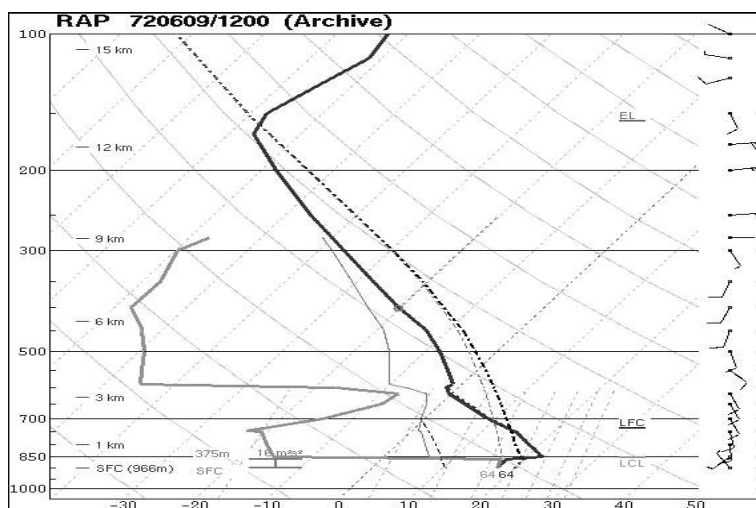


Рис. 1 – Развитие неустойчивости при низкой влажности

Этот пример аэрологической диаграммы был составлен за несколько часов до формирования интенсивных гроз, сопровождающихся интенсивными ливневыми осадками. Хотя в данном примере значение индекса Шуолтера номинально соответствует негрозовым условиям.

В отличие от индекса Шуолтера, расчет энергии неустойчивости предполагает наличие данных измерений более чем на двух стандартных изобарических уровнях.

Благодаря тому, что энергия неустойчивости рассчитывается путём интегрирования, она меньше подвержена инструментальным погрешностям, чем параметры, относящиеся к классу производных. Очевидно, что одинаковое значение энергии неустойчивости может рассчитываться из строго отличающихся друг от друга вертикальных распределений термически поднимающихся частиц (рис. 2).

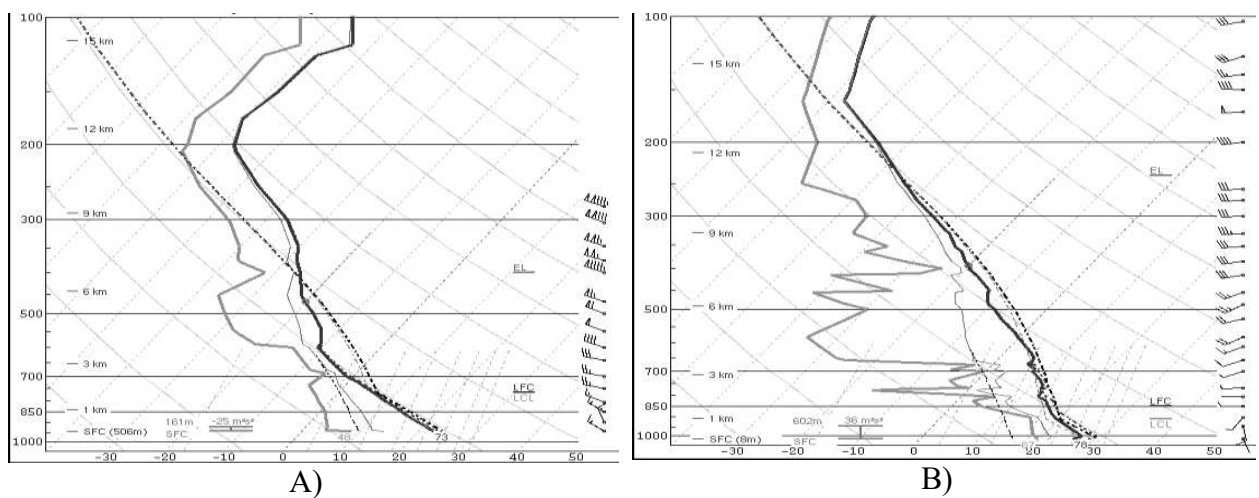


Рис. 2 – Результаты радиозондирования с очень близкими (равномерными) значениями энергии неустойчивости, но отчетливо различающимися вертикальными распределениями

Несмотря на определенный риск использования показателя лишь одного прогностического параметра, такая практика имеет место в силу широкого распространения диагностических параметров [7]. Часто это обуславливается дефицитом времени, в ситуациях, когда приходится принимать оперативное решение. Можно полагать, что составление прогноза на базе прогностических компонент является вполне обоснованным подходом [5] диагностирования, способствующее оперативному прогнозированию исследуемого явления в условиях ограниченности во времени.

Утилитарный подход к факту пригодности прогностического параметра, склоняет к позиции оправдывающего его использование при любых обстоятельствах.

Такой аргумент является заведомо не верным, особенно в тех случаях, когда прогностический параметр не имеет физического обоснования. Доказательство пригодности индекса может быть неопровержимым лишь в том случае, когда разработанный индекс действительно основан на физическом принципе, поскольку только физически обоснованный

прогностический параметр является превосходным средством для прогнозирования. Учёт физической закономерности всегда приветствуется при разработке прогностического параметра или индекса, а простота использования и полезность делают их пригодным в глобальном масштабе.

В последние годы в практике прогнозирования гроз довольно распространены стали прогностические карты, построенные на основе двух диагностических параметров – CAPE и LI (рис. 3).

Таким образом, интерпретация синоптической ситуации посредством одного диагностического параметра, пусть даже универсально объединяющего комплекс аэрологических величин характеризующих неустойчивость не обеспечивает его объективность. Эффективное использование прогностических параметров в прогнозах, как дополнительной информации, упрощает процесс прогнозирования, но использование только лишь одних параметров, пренебрегая синоптической информацией, является заведомо рискованным шагом, снижающим достоверность прогноза.

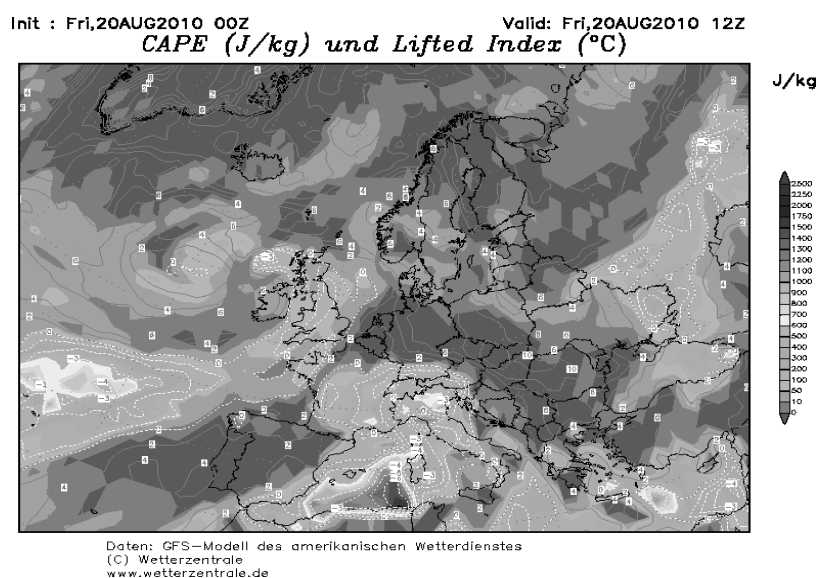


Рис. 3 – Карта вероятности гроз по данным CAPE/LI (www.wetterzentrale.de)

Также вызывает определённые сомнения относительно надёжности тот факт, что многие из прогностических параметров не были испытаны самостоятельно с помощью эффективных методов. Таким образом, рассмотрим, каким же требованиям должны отвечать прогностические параметры и какие методы должны быть использованы для их валидации.

С целью оценки применимости экспериментальной величины в качестве диагностического параметра можно использовать факторную таблицу классической формы (стандартная таблица верификации для раздвоенного прогноза «да/нет»). Создание такой таблицы, для потенциального диагностического параметра начинается с определения пороговых значений параметра – случай «да» (прогнозируется), если величина в пределах пороговых значений, случай «нет» (не прогнозируется) при запредельных значениях. Оценка точности прогноза с использованием

экспериментальных данных будет выполняться с заполнением факторной таблицы с помощью пороговых величин.

Достоверность предлагаемого метода определяется путем сравнения его со стандартным методом прогнозирования. Если схема прогнозирования, использующая диагностический параметр показывает значительную статистическую корреляцию со стандартным синоптическим методом, то его можно рассматривать как пригодный прогностический параметр.

При применении диагностических параметров часто возникают две проблемы. Первая обуславливается тем, что, как правило, оценка диагностического параметра осуществляется на основе малого количества исследуемых случаев [8]. Вторая проблема связана с тем, что часто при попытке обосновать пригодность некоторых прогностических параметров (при рассмотрении только тех их значений, которые совпадают с уже прогнозируемыми случаями) возникает логическая ошибка. Использование диагностических параметров становится менее эффективным, если они не отражают четкое разделение между прогнозированием и не прогнозированием случаев гроз.

Кроме того, одной из важных характеристик диагностических параметров является заблаговременность их применения обеспечивающая допустимую точность вероятности прогнозируемого случая.

Для анализа корреляции временной задержки между прогностическим параметром и формируемым случаем, факторные таблицы, следует разрабатывать в соответствии с изменчивостью сроков диагностики – за 12, 6, 3 и 1 час до формирования, прогнозируемого случая. В этом случае точность прогностического параметра определяется как функция времени.

В практике метеорологического обеспечения авиации применяется значительное число универсальных и региональных методов прогноза гроз [9–11]. Следуя предлагаемому методу оценки применимости параметра, была проведена экспериментальная оценка широко используемых методов и параметров, на основе ретроспективного анализа аэрологических данных за 2004-2008 гг. аэрологической станции Маштаги (Азербайджан). Результаты анализа отражены в табл. 1. и табл.2.

Таблица 1 – Оправдываемость численных методов прогнозирования гроз на аэродроме Гейдар Алиев (Азербайджан)

№	Метод прогноза или параметр	Средняя оправдываемость (%)
1	Метод Решетова	65 %
2	Метод Сосина	58%
3	Число Вайтинга	59%

Таблица 2 – Оправдываемость прогностических параметров гроз на аэродроме Гейдар Алиев (Азербайджан)

№	Метод прогноза или параметр	Средняя оправдываемость (%)
1	CAPE	60 %
2	LI – lifted index	35%
3	SI – Showlter index	78%
4	TT – Total-totals	60 %

Вышеуказанные методы и параметры оценены как по грозовым, так и негрозовым ситуациям. Согласно табл. 1 наибольшая оправдываемость определена для метода Решетова. Этот метод, разработанный специально для целей обслуживания авиации, ориентирован преимущественно на прогноз гроз и града на атмосферных фронтах.

Метод Сосина разработан для условий Закавказья. Он применяется для прогноза в горных районах. Этим объясняется его относительно наименьшее значение оправдываемости по сравнению с другими методами в условиях географического месторасположения аэродрома Гейдар Алиев.

Согласно табл. 2 самая высокая оправдываемость была определена для САРЕ и ТТ.

Достаточно широкое применение в оперативном прогнозировании приобрел метод Вайтинга. Этот простой метод состоит в расчете индекса грозовой активности K (по прогностическим профилям температуры и точки росы).

Значения индекса K также были рассмотрены по градациям отражающим количественные характеристики соотношения интенсивности условий формирования гроз на аэродроме Гейдар Алиев (табл. 3).

Результаты анализа являются далеко неабсолютными, так как при расчетах имели место определенные недостатки, связанные с весьма ограниченным значением статистического ряда данных, инструментальными погрешностями, невозможностью доступа к некоторым данным, являющимся составной частью расчетов. Так, например, при верификации значений индекса K , не были учтены условия конвергенции потоков в слое 850-700 гПа, где схождение изогипс означали бы рост вероятности формирования гроз.

В табл. 4 указаны характерные градации энергии неустойчивости, наблюдаемые на аэродроме Гейдар Алиев.

Другой метод оценки потенциала прогностического параметра связан с построением многомерной диаграммы рассеяния (скажем для случая двух величин энергии неустойчивости и сдвига ветра), в которой, ссылаясь на значения диагностических параметров, графически наносятся как случаи формирования явления, так и случаи его неформирования.

Таблица 3 – Результаты верификации оправдываемости метода Вайтинга по градациям

Градация числа Вайтинга	$K < 20$ Не ожидается	$20 \leq K < 25$ Отдельные грозы	$25 \leq K < 30$ Редко разбросанные	$30 \leq K < 35$ Грозы	$35 \leq K$ Много--численные грозы
Значение оправдываемости	86%	50%	53%	50%	-
Среднее значение оправдываемости	59%				

Таблица 4 – Повторяемость градаций энергии неустойчивости на аэродроме Гейдар Алиев

CAPE (Дж/кг)	Повторяемость (%)	Интенсивность
0 до 999	55%	Несущественная неустойчивость
1000 до 2500	29%	Умеренная неустойчивость
2500 до 4000	16%	Сильная неустойчивость
>4000	0%	Экстремальная неустойчивость

Выше были рассмотрены некоторые методы оценки эффективности диагностических параметров. Конечно же, рассматриваемые методы не могут охватывать все аспекты оценки эффективности критериев прогностических параметров, что требует более детального подхода к изучению данного вопроса.

Выводы.

1. В результате анализа базовых принципов разработки диагностических параметров выяснились некоторые недостатки, связанные в частности с физической необоснованностью некоторых прогностических параметров, что затрудняет связать параметр с физической сущностью рассматриваемого процесса.

2. По результатам оценки эффективности критериев диагностических параметров, выявлена необходимость внедрения надежных экспериментальных методов их валидации.

3. Количественная оценка прогностических методов, используемых в оперативном прогнозировании гроз на аэродроме Гейдар Алиев, позволила определить целесообразность использования современных и надежных параметров таких как, параметр Вайтинга (K), энергия неустойчивости (CAPE), индекс неустойчивости (LI).

Таким образом, учитывая нелинейность (хаотичность) атмосферных процессов, немислимо разработать универсальный параметр пригодный для всех случаев. Для достижения более приближенных прогностических моделей, целесообразно использовать данные современных измерителей, телеметрических систем (доплеровские радиолокаторы двойной поляризации, спутниковые системы, аэрологические зонды) на базе инновационных технологий и современные методы статистического анализа.

Список литературы

- Banacos P.C. and Schultz D.M.* The use of moisture flux convergence in forecasting convective initiation: Historical and operational perspectives // *Wea. Forecasting.* – 2005. – Vol. 20. – P. 351-366.
- Brock F.V. and Richardson S.J.* Meteorological Measurement Systems. – Oxford University, 2001. – 290 p.
- Doswell C., Schutz D.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // *Electronic J. Severe Storms Meteor.* – 2006. – Vol. 1(3). –P. 1-22.
- Doswel C.A.* Short range forecasting. *Mesoscale Meteorology and Forecasting.* / P. Ray, Ed. – Amer. Meteor. Soc., 1986. – P. 689-719.
- Doswel C.A., Brooks H.E. and Maddox R.A.* Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology // *Wea. Forecasting.* – 1996. – Vol. 11. – P. 560-581.
- Johns R.H. and Doswell C.A.* III Severe local storms forecasting. // *Wea. Forecasting.* 1992. – Vol. 7. – P. 588-612.
- Pliske R.M., Crandall*

B. and Klein G. Competence in weather forecasting. *Psychological Investigations of Competence in Decision Making* / K. Smith, J. Shanteau, and P. Johnson, Eds. – Cambridge Univ. Press, 2004. – 40-68 pp. **8.** *Wilks D.S.* *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* / Second Ed. – Academic Press, 2006. – 627 p. **9.** Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / Под ред. Абрамович К. Г., Васильева А. А. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – С. 132-154. **10.** Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 1. – Л. : Гидрометеиздат, 1986. – 701 с. **11.** *Решетов Г.Д.* Прогноз дневных и ночных гроз / Г. Д. Решетов // Труды Гидрометцентра СССР. – 1977. – Вып. 176. – С. 86-96.

Гусейнов Н.Ш., Шниг В.М., Меликов Б.М. **Діагностичні параметри умов формування гроз.** Розглянуто базові принципи розробки індексів і параметрів, які використовуються при прогнозуванні гроз. Приведено основні вимоги до розробки діагностичних параметрів прогнозування гроз. Розглянуто схему класифікації діагностичних параметрів, з метою виявлення їх лімітних значень, котрі визначають діагностування і прогнозування нестійкості в атмосфері. Виконано верифікацію деяких методів прогнозування гроз для різних синоптичних умов (з грозою і без грози), які мали місце на території Азербайджану.

Ключові слова: прогноз; метод; гроза.

Huseynov N.Sh., Shpyg V.M., Melikov B. **Diagnostic parameters of conditions of thunderstorms formation.** The article describes the basic principles for the development of indices and parameters used for forecasting of thunderstorms. The basic requirements for the development of diagnostic parameters forecasting thunderstorms are shown. A scheme for the classification of diagnostic parameters in order to identify their limit values defining the diagnosis and prediction of instability in the atmosphere is discussed. The verification of some methods of thunderstorms forecasting for different synoptic conditions (with and without thunderstorms events), which were observed on the territory of Azerbaijan, were conducted.

Keywords: forecast; method; thunderstorm.

Гусейнов Н.Ш., Шниг В.М., Меликов Б.М. **Диагностические параметры условий формирования гроз.** Рассмотрены базовые принципы разработки индексов и параметров, используемых в прогнозировании гроз. Приведены основные требования к разработке диагностических параметров прогнозирования гроз. Рассмотрена схема классификации диагностических параметров, с целью выявления их лимитных значений, определяющих диагностирование и прогнозирование неустойчивости в атмосфере. Выполнена верификация некоторых методов прогнозирования гроз для различных синоптических условий (с грозой и без грозы), которые имели место на территории Азербайджана.

Ключевые слова: прогноз; метод; гроза.

Надійшла до редколегії 22.10.2013