

**Д.В. Пишняк, В.М. Шпиг, к.геогр.н.**

*Украинский гидрометеорологический институт*

**Г.П. Ивус, к.геогр.н., проф.**

*Одесский государственный экологический университет*

## **МЕЗОМАСШТАБНАЯ ДОСТУПНАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ФРОНТАЛЬНОГО РАЗДЕЛА КАК ХАРАКТЕРИСТИКА ЕГО КОНВЕКТИВНОЙ И ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ**

*Предложен параметр, характеризующий запасы мезомасштабной составляющей доступной потенциальной энергии фронтальной зоны. Получено статистическое подтверждение связи запаса энергии фронта с грозовой активностью. Проведено сопоставление оценок диагностического качества предложенного параметра с некоторыми другими параметрами, которые могут использоваться для диагноза и прогноза активности конвекции на фронте.*

**Ключевые слова:** доступная потенциальная энергия, энергия неустойчивости, фронтальная зона, конвекция, фильтрация, успешность прогноза.

**Введение.** Атмосферная циркуляция включает широкий спектр возмущений различных масштабов, которые разными способами получают энергию для своего существования. Проблема оценки источников энергии важна для диагноза и прогноза развития атмосферных возмущений как в экспериментально-исследовательской, так и в прикладной сфере метеорологии. На сегодняшний день известны два классических направления применения энергетического подхода при описании атмосферной циркуляции: доступная потенциальная энергия (ДПЭ) крупномасштабной (синоптической) циркуляции, определение которой дано Лоренцем [1, 2] и конвективная доступная потенциальная энергия (CAPE) [3, 4, 5], также известная как энергия вертикальной неустойчивости. Заведомо не принимая в рассмотрение мезомасштабные процессы турбулентности, отметим, что в обозначенном охвате этих классических подходов выпущены из виду циркуляции на стыке масштабов конвекции и синоптических объектов. Другими словами, атмосферные процессы мезомасштаба  $\alpha$ , и  $\beta$ , оставлены без должного внимания в аспекте энергетической диагностики, о чем свидетельствует сравнительно малое количество публикаций по данному вопросу.

В настоящей статье оценивается диагностическое качество предложенного метода для определения потенциальных энергозапасов мезомасштабных систем циркуляции атмосферы, более подробно описанного нами в [6]. Оценка производится через сопоставление с данными фактической грозопеленгации. Выбор направления и методов исследования обусловлен совпадением очагов запасов энергии с областями развития глубокой конвекции на атмосферных фронтах и в циклонах над сушей.

**Цель работы** состоит в подтверждении связи между запасами мезомасштабной ДПЭ и грозовой активностью, установлении ее пороговых значений для развития гроз и в проведении сравнения предложенного метода расчета с другими критериями, которые используются для диагноза интенсивности глубокой конвекции.

**Методы исследования.** Определение мезомасштабной составляющей доступной потенциальной энергии производится при помощи метода, описанного в [6], согласно следующему выражению

$$ОПЭ_i = m_i g \int_{h_z}^{h_E} \frac{\bar{p}T_i - p_i\bar{T}}{p_i\bar{T}} |dh| = m_i g \int_{h_z}^{h_E} \frac{\theta_i - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} |dh|, \quad (1)$$

где  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $\theta$  – потенциальная или потенциальная виртуальная температура;  $g$  – ускорение свободного падения;  $m$  – масса. Черта сверху означает осреднение по уровню  $h_z + dh$ , индекс  $i$  – обозначает частицу, перемещающуюся адиабатически с рассматриваемого уровня  $h_z$  до высоты выравнивания температур  $h_E$ .

ОПЭ (относительная потенциальная энергия) равнозначна ДПЭ, но отличается знакопеременностью величины, что достигается благодаря модулю  $|dh|$ . Модуль введен только из соображений удобства анализа, поскольку знак указывает на направление вертикального смещения частицы, необходимого для достижения гидростатического равновесия и реализации неустойчивости. Применение в выражении потенциальной температуры позволяет более точно описывать горизонтальную неоднородность плотности среды.

Выделение мезомасштабной составляющей в предложенном методе осуществлялось через ограничения объема, в котором производится расчет выражения для частицы. Алгоритм работает подобно низкочастотному фильтру, отсекая крупномасштабную составляющую атмосферных неоднородностей при расчете энергии неустойчивости.

Согласно изложенной идеи, метод требует задания порога отсечения для характерного масштаба процесса. Из общих сведений известно, что ширина горизонтальной проекции фронтальной зоны, выражающаяся в сопутствующих явлениях и облачности, достигает 500 км [5, 7], тогда как приземная часть переходной зоны может быть достаточно узкой, от десятков километров и менее [8]. Вдобавок, для объективности задания порога отсечения, по данным моделирования высокого пространственного разрешения проведены экспериментальные расчеты с различным порогом отсечения, результаты которых можно видеть на рис. 1. Основной энергозапас фронтальной зоны обнаруживается при пороге отсечения  $\Delta f$  около 500 км. Кроме того, наблюдается перекрытие энергозапасов значимых как для развития конвективных возмущений, так и для фронтального раздела в диапазоне  $\Delta f$  550-370 км. Для нашего исследования возьмем порог отсечения около 450 км, как наиболее удобный с позиции конечно-разностной вычислительной реализации с учетом разрешения использованных исходных данных.

Значения ОПЭ определяются на каждом уровне модельной атмосферы, что создает некоторые неудобства для обобщенного анализа, поэтому для практических целей предлагается использовать следующую интегральную характеристику, условно обозначаемую FАРЕ. Она представляет собой положительную часть ОПЭ, рассчитанную по выражению (2) в масштабе около 450 км и затем просуммированную по всем уровням модельной атмосферы, с учетом массы каждого слоя. Уравнение, записанное в удельном представлении, имеет вид

$$FAPE_i = \frac{1}{m} g \int_1^L \int_{h_L}^{h_E} \frac{\theta_i - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} |dh| dm, \quad (2)$$

где  $L$  – количество вертикальных уровней модели;  $m$  – масса столба атмосферы до уровня  $L$ ;  $dm$  – масса столба атмосферы между уровнями модели;  $\bar{\theta}$  – потенциальная виртуальная температура, осредненная в пределах 450 км. Остальные обозначения те же, что и в (1).

Именно этот параметр и будет использован для дальнейшего сравнения в исследовании как характеристика мезомасштабной доступной потенциальной энергии фронтальной зоны. Но прежде чем приступить к анализу полученных результатов, отметим, что FАРЕ учитывает только термическое вынуждение вертикальных токов

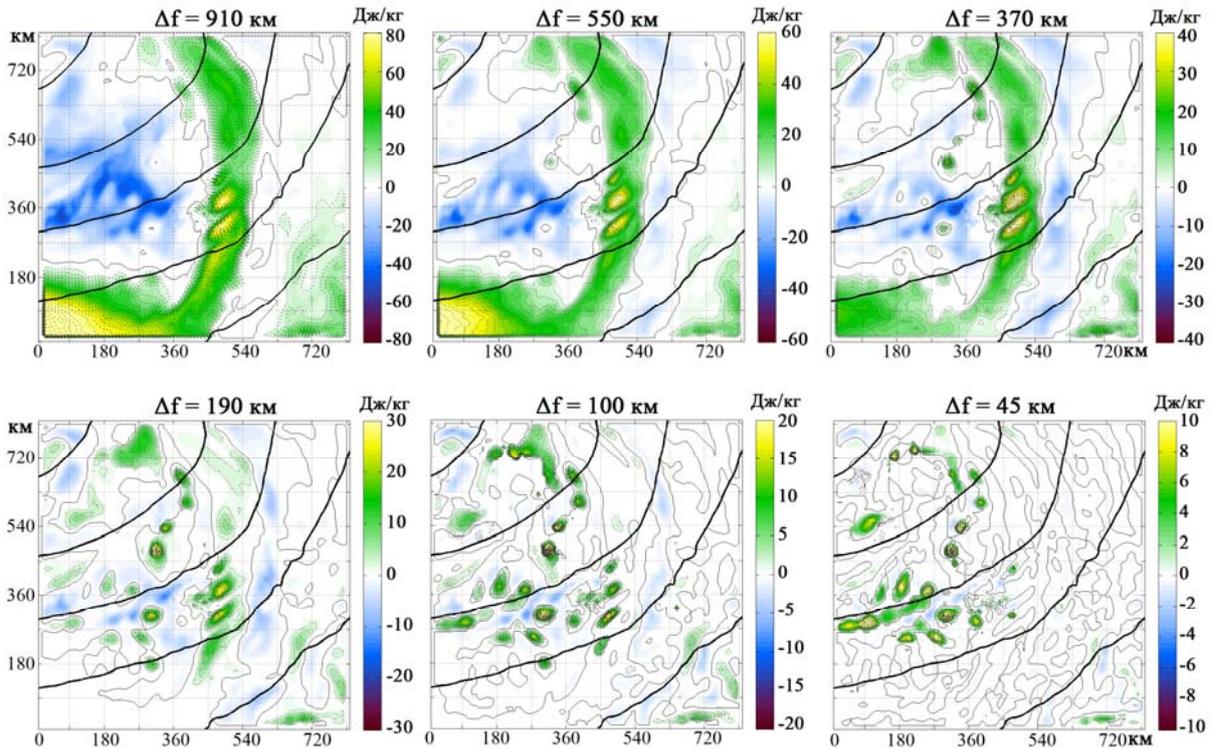


Рис. 1 – Мезомасштабная ОПЭ, рассчитанная по фильтру с различным порогом отсечения  $\Delta f$ , на высоте 1,6 км, 18.03.2002 23:00 UTC на момент прохождения фронта над районом Центральной Европы. Поле давления отражено жирными черными изолиниями, проведенными через 5 гПа.

фронтальной зоны, т.е. описывает лишь статическую составляющую неустойчивости. Динамическая неустойчивость фронтального раздела, формирующаяся преобразованиями кинетической энергии потока, непосредственно не учитывается данным параметром. Также параметр FAPE (рассчитанный в масштабе 450 км) не пригоден для характеристики более мелких структур типа внутримассовой конвекции.

Параллельно проведем аналогичное исследование по известному и распространенному параметру CAPE (Convective Available Potential Energy или энергия неустойчивости), а также по интенсивности конвективных осадков (которую условно обозначим CPR), как комплексному показателю интенсивности глубокой конвекции.

Результаты статистических расчетов, на которых основано настоящее исследование, получены посредством прямого сопоставления очагов запасов энергии или осадков и местоположения грозовых разрядов в пространстве, как это показано на примере 28 апреля 2013 (рис. 2). Базовую статистику по результатам такого сопоставления выразим процентами площади, занятой оправдавшимся прогнозом на наличие грозы, а также площади, занятой ошибками пропуска и ошибками перестраховки метода, рассчитанными относительно общей площади территории.

**Исходные данные.** Исследование базируется на данных прогноза глобальной модели GFS с разрешением  $0.5^\circ$  широтно-долготной сетки заблаговременностью 0-48 ч. В расчетах использован срок инициализации модели 00 UTC каждых суток на протяжении шести месяцев (апрель-сентябрь 2013 г). Двухдневная заблаговременность прогноза позволяет охватить полный суточный цикл развития конвекции, а также сравнить результаты для первых и вторых суток. Поля CAPE и CPR позаимствованы из модели GFS в оригинальном виде без каких либо изменений. В качестве фактического материала использовались данные грозопеленгации, полученные из World Wide Lightning Location Network (wwlln.net).

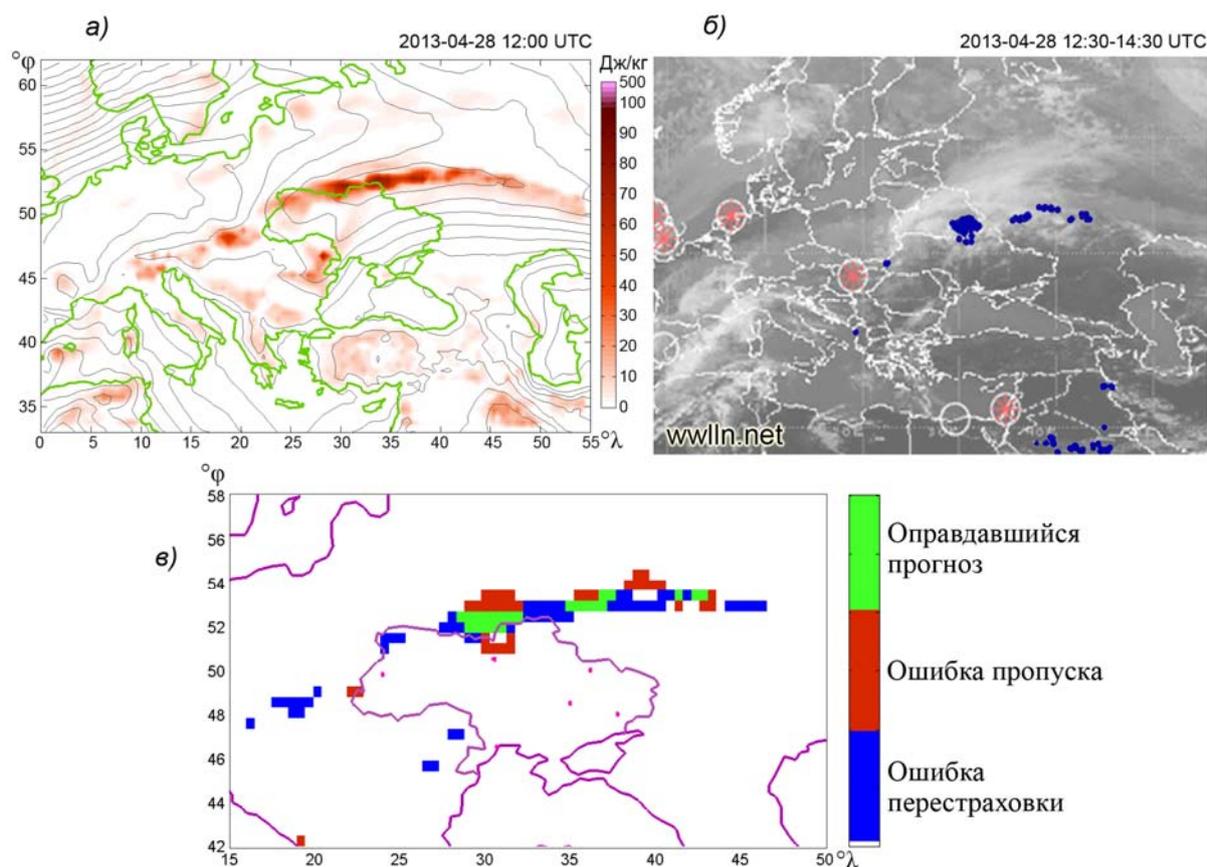


Рис. 2 – Пример сопоставления диагностического поля FAPE (а) и фактических данных грозопеленгации (б) для срока 12:00 UTC 28 апреля 2013. в) – площади успешного и ошибочного прогноза наличия грозы, а также пространственный охват района исследования

Статистические расчеты, представленные далее, производились путем сопоставления критических значений диагностических параметров и положения грозовых разрядов в пространстве. Для этого графические данные грозопеленгации перераспределены в регулярную сетку с разрешением  $0.5^\circ$ , которая аналогична используемой в модели GFS. Алгоритм перераспределения организован таким образом, что ячейка сетки считается содержащей грозу при попадании в ее пределы обозначения грозового разряда. Время накопления грозовых разрядов принято равным 3 часам в соответствии с временным разрешением данных модели GFS. Наглядную демонстрацию используемого подхода для дальнейшей статистической обработки можно видеть на рис. 2, где приведен пример визуализации FAPE (рис. 2а) с заблаговременностью 12 часов от 00:00 UTC 28 апреля 2013 г. На рис. 2б дан фрагмент композиций оригинальных карт грозопеленгации за период с 12:30 до 14:30 UTC того же дня, а на рис. 2в – результат наложения этих прогностических (диагностических) и фактических данных. Разной заливкой обозначены площади оправдавшегося прогноза на наличие грозы, ошибки пропуска и перестраховки. Территория, приведенная на рис. 2в, соответствует району исследования, для которого произведены обобщающие статистические расчеты. Следует уточнить, что в модели GFS предусмотрено два типа энергии CAPE, рассчитанной с различными начальными условиями подъема частицы, а именно от поверхности земли или из некоторого приповерхностного слоя. В исследовании использован первый вариант, как более предпочтительный, по мнению авторов, при прогнозе конвекции в районе исследования.

**Результаты исследования и их анализ.** При использовании диагностических параметров обычно отталкиваются от некоторых пороговых значений, которые позволяют ожидать развитие определенных атмосферных явлений той или иной интенсивности. Так, подобного рода критерии используются в синоптической практике для CAPE, рассчитанного по данным зондирования, а результаты многолетней статистики для территории Украины приведены, например в [9].

Аналогичным образом на первом этапе нашего исследования определим некоторые критические значения выбранных диагностических параметров, превышение которых будет указывать на возможность развития грозы в данном районе. Для выполнения такой задачи поставим достаточно мягкое условие обеспечить 50% вероятность успешного прогноза наличия грозы, хоть и в достаточно узком 3-х часовом интервале времени, соответственно временному разрешению данных модели. Здесь уточним одну техническую деталь расчетов: для энергетических параметров FARE и CAPE будем сопоставлять накопленные данные грозопеленгации за 3 часа, следующие сразу за расчетным сроком, предусматривая некоторую задержку в реализации энергии неустойчивости, а для конвективных осадков (CPR) – тот же период накопления грозовых разрядов, но перед конкретным сроком, обеспечивая, таким образом, полное соответствие сравниваемых данных по времени.

Поузловое сопоставление показывает, что 50% гроз над рассматриваемой территорией наблюдаются при значении FARE в 2 Дж/кг или более, а само распределение количества случаев по величине FARE проявляет очень выраженный нелинейный характер, достигая максимума около 300 Дж/кг (рис. 3а). К сожалению, такие статистические показатели нельзя считать удобными для практического использования. Для величины CAPE, рассчитанной непосредственно моделью GFS, 50% вероятность грозы обеспечивается значением 315 Дж/кг и более. Распределение количества узлов с грозой по величине CAPE (рис. 3б) близко к линейному в широком диапазоне энергозапаса (от 50 до максимума около 2500 Дж/кг). Этот результат указывает на удобство практического использования параметра, хотя полученная пороговая величина 315 Дж/кг является немного меньше рекомендуемой в [9], несмотря даже на относительно мягкие условия оценки успешности прогноза.

И, наконец, оценим качество прогноза глубокой конвекции в самой модели атмосферы, для чего аналогичным образом сопоставим интенсивность конвективных осадков (мм за 3 часа) с распределением наблюдаемой грозовой активности. Постановка эксперимента оставлена та же – установить пороговое значение интенсивности конвективных осадков, обеспечивающее 50% вероятность грозы. Однако результаты такого сопоставления оказались неожиданно плохи, так как пороговое значение составило менее чем 0,05 мм/3 часа, что выходит за пределы практической точности данных наблюдений за осадками. Область конвективных осадков более 0,1 мм/3 часа обеспечивает перекрытие лишь 44% грозовых очагов, т.е. остальные 56% гроз наблюдаются на территории с количеством конвективных осадков 0 – 0,1 мм, выпавших за 3 часа в модели GFS. Распределение количества ячеек с грозой по CPR проявляет сильную нелинейность (рис. 3в), с учетом логарифмической шкалы. Следовательно, конвективные осадки, рассчитанные в модели GFS, оказываются наихудшим предиктором для определения местоположения гроз.

Причина неудовлетворительных результатов тестирования, по видимому, кроется в характере распределения выбранных метеорологических параметров. Так, если поля CAPE являются достаточно гладкими, а ее очаги покрывают обширные площади, то поля FARE и CPR – весьма расчленены. В результате такой расчлененности даже небольшие пространственные расхождения модельных и фактических очагов приводят к неудовлетворительным результатам оценки для более

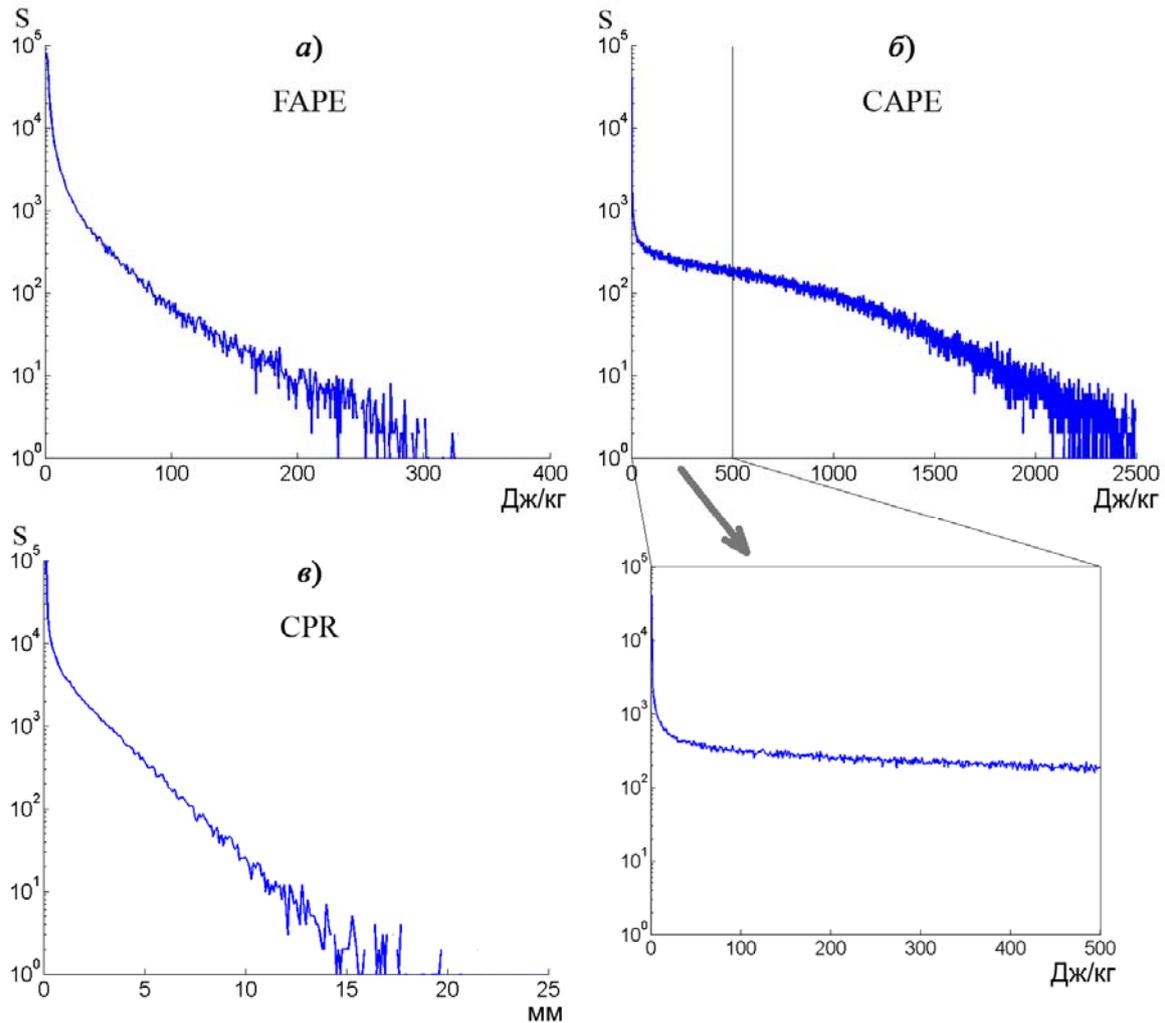


Рис. 3 – Плотность распределения количества ячеек сетки с грозой по значениям диагностических параметров. (а) – FARE (интервал 1 Дж/кг), (б) – CAPE (интервал 1 Дж/кг), (в) – конвективные осадки модели GFS (интервал 0,1 мм).

комплексных диагностических параметров. И действительно, при рассмотрении конкретных случаев пространственного распределения гроз и зон конвективных осадков в модели, отмечается частое их небольшое несоответствие или смещение относительно друг друга. Подобный же эффект наблюдается и с очагами FARE. Понятно, что такие несоответствия могут включать как случайную составляющую, из-за неточности модельной симуляции атмосферы, так и физически обоснованную часть. Например, FARE обычно реализуется с задержкой до нескольких часов. За это время развивающиеся конвективные возмущения успевают сместиться на десятки и сотни километров от мест их инициализации по ведущему потоку. Для подтверждения такого предположения и лучшего его учета при оценке качества диагностических параметров, сделаем такую операцию как растяжение (распространение) максимума величины в рассматриваемых диагностических полях. Растяжение максимума выполним в радиусе около 100 км, заимствуя его значение из ближайших узлов сетки, по шаблону, показанному на рис. 4. В результате операции формируется новое поле, содержащее максимальные значения из некоторой ограниченной области исходного поля. При этом очаги повышенных значений как бы расширяются, охватывая больше площади.

После проведения растяжения рабочая гипотеза выразится следующей формулировкой: значение диагностического параметра определяет возможность

развития грозы в радиусе 100 км от каждого узла сетки. Уточним, что в предыдущем опыте радиус определялся размером самой ячейки сетки и составлял около 30 км. После операции растяжения максимума выполним тестирование еще раз.

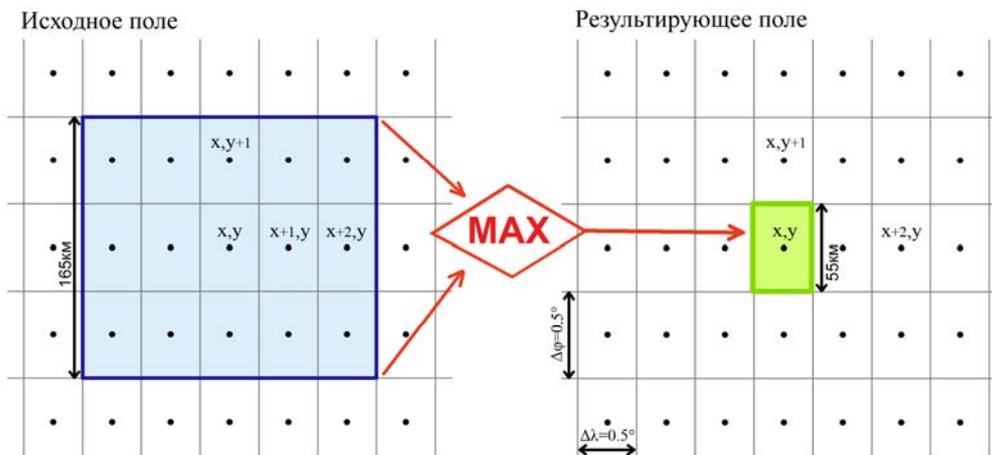


Рис. 4 – Используемый сеточный шаблон и принцип вычислений в операции растяжения максимума.

Теперь, 50% вероятность успешного прогноза грозы обеспечивается значениями FARE более 8 Дж/кг. В два раза возросло и пороговое значение для CAPF, составив 632 Дж/кг, и в около 30-ти раз порог конвективных осадков, достигнув практически приемлемых 1,4 мм. Применение новой гипотезы позволило уменьшить проявление нелинейности в распределении количества узлов с грозой по величине FARE и CPR, улучшив их диагностические свойства, чем демонстрируется большое влияние на результаты оценки качества прогноза малозаметных смещений фактических и прогностических очагов дискретных полей. Однако, следует заметить, что увеличение радиуса растяжения приводит к сглаживанию полей и с некоторого момента ставит под вопрос практическую ценность решения, поэтому остановимся только на выше предложенном значении радиуса и варианте расчетного шаблона, как оптимальном.

Далее рассмотрим подробнее показатели качества прогноза 50% вероятности гроз по исходным полям и полям после операции растяжения максимума. На графиках рис. 5а представлены осредненные данные за 6 месяцев исследуемого периода в пределах рассматриваемого района; показаны процент площади занимаемой ошибкой перестраховки метода, ошибкой пропуска явления и процент площади успешного прогноза. По оси абсцисс отложена заблаговременность прогноза. Примерно равнозначная площадь ошибки пропуска и верного прогноза отражает заведомо заданную 50% вероятность. На графиках рис. 5б аналогичным образом приведена успешность прогноза, определяемая как отношение площади верного прогноза к суммарной площади верного и ошибочного прогнозов. Отношения рассчитаны как для ошибки пропуска, так и для ошибки перестраховки по соответствующим выражениям:

$$P_{mis} = \frac{cor}{cor + mis}, \quad (3)$$

$$P_{ins} = \frac{cor}{cor + ins}, \quad (4)$$

где  $cor$  – процент площади успешного прогноза;  $mis$  – процент площади занимаемой ошибкой пропуска;  $ins$  – ошибкой перестраховки метода.

В табл. 1 также представлены обобщенные средние величины за двое суток заблаговременности прогноза. Как видно из приведенных графиков, чтобы обеспечить 50% вероятность успешного прогноза грозы, все диагностические параметры допускают очень большую перестраховку по территории, покрывая до 25 – 30% рассматриваемого района, тогда как действительная площадь, занятая грозами, достигает только 8%. Характер распределения кривых для параметров FARE и CARE имеет много общего. Наилучшим образом эти параметры проявляют себя в послеполуденные часы, на что указывают обе характеристики успешности (рис. 5б). Заметно, что у параметра FARE максимальная оправдываемость приходится на 12:00 UTC, тогда как CARE – на 15:00 UTC. В целом последний проявляет меньшую ошибку перестраховки, составляющую при осреднении 9,3% против 20,2% у FARE. Сравнивая первые и вторые сутки прогноза, можно отметить идентичность конфигурация кривых и незначительные различия точности прогноза гроз. Это указывает на стабильность модели и в среднем одинаковую успешность прогноза на первые и вторые сутки.

Рассматривая конвективные осадки, приходим к заключению, что модель допускает максимум перестраховки в допосуденное время, как бы опережая развитие конвекции. В сравнении с вышерассмотренными диагностическими параметрами, конвективные осадки примерно с той же успешностью прогнозируют дневные грозы, однако в ночное время точность этого критерия оказывается значительно выше. Такой результат объясняется учетом динамического фактора, при расчете вертикальных токов в модели. В среднем CPR занимает промежуточную позицию по ошибке перестраховки, составляющей 14,0% территории (табл. 1). Однако то, что оценка точности прогноза гроз по конвективным осадкам в дневное время практически совпадает с прогнозами по FARE и CARE выглядит несколько разочаровывающее, ведь последние совсем не учитывают информацию о динамике среды, которая играет немаловажную роль в иницировании и поддержании вертикальных токов. В этом случае можно только сделать вывод, что прогноз конвективных осадков в используемой модели еще имеет потенциал для усовершенствования.

Наконец рассмотрим в сравнении результаты, полученные после операции расширения максимума. Как можно заметить на самих графиках (рис. 6), так и в итоговой таблице (табл. 1), при заданной 50% вероятности успешного прогноза, ошибка перестраховки у параметра FARE и у конвективных осадков заметно уменьшается во все сроки. Для FARE немного изменились и сами закономерности распределения площадей. За счет сокращения площади перестраховки повысились значения успешности прогноза. Однако на показатели CARE расширения максимума практически не оказало влияния, лишь незначительно ухудшив характеристики, что следовало ожидать исходя из сглаженности его исходных полей. Сумма значений оправдавшегося прогноза и ошибки пропуска составляют количество процентов всей площади, покрытой грозовой активностью. Отличие у CPR от FARE и CARE (табл. 1) объясняются исключением из расчета начального срока, для которого осадки в модели еще попросту отсутствуют. Данное обстоятельство можно заметить и на рис. 5, 6. Впрочем, если рассматривать обеспеченность вероятности 80-90%, при которой, согласно рис. 3б, наблюдается сильная нелинейность даже по параметру CARE, то растяжение максимума позволяет немного улучшить практические показатели и этого параметра, (табл. 2).

В табл. 2 приведены пороговые значения рассматриваемых параметров для различной обеспеченности успешного прогноза грозы. Как можно заметить, без операции растяжения максимума ни один из параметров не способен обеспечить 90% оправдываемость прогноза наличия грозы по рассматриваемой территории. На основе

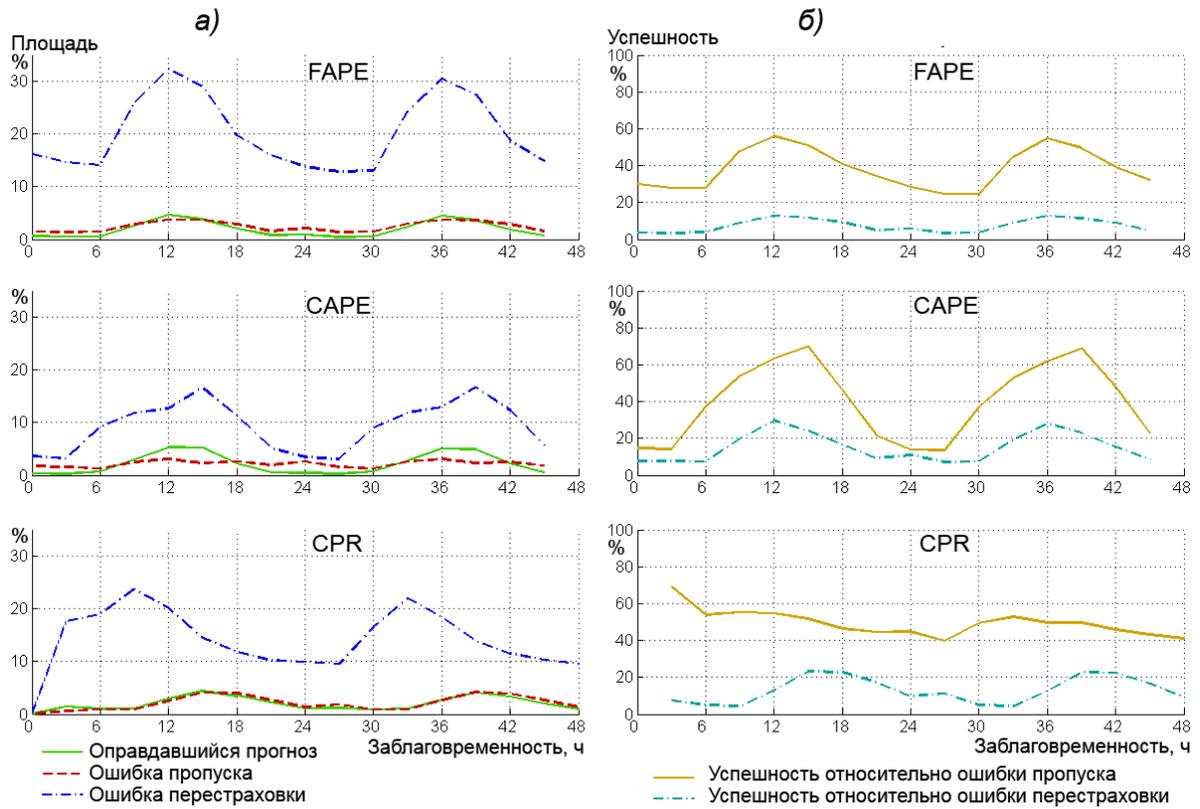


Рис. 5 – Процент площади, покрытой оправдавшимся прогнозом, ошибками пропуска и перестраховки прогноза на наличие грозы (а), и успешности прогноза (б), рассчитанные по оригинальным данным для различной заблаговременности прогноза.

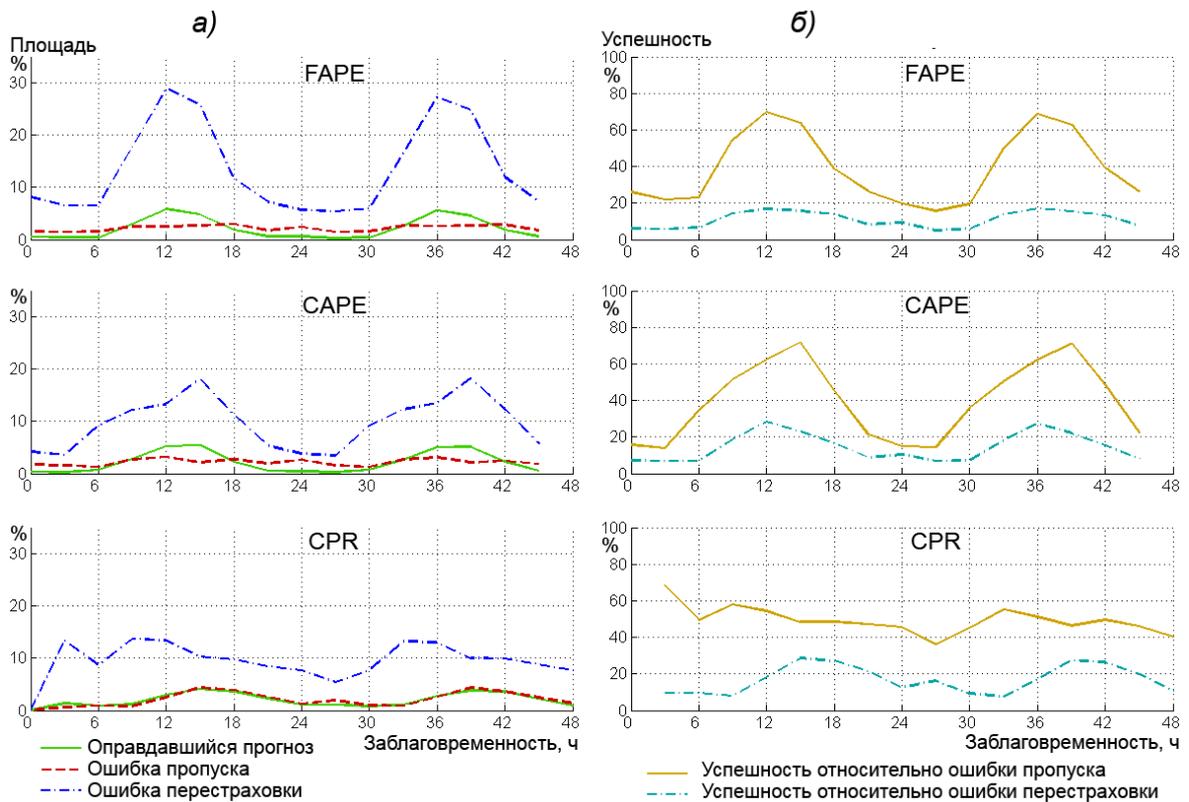


Рис. 6 – Процент площади, покрытой оправдавшимся прогнозом, ошибками пропуска и перестраховки прогноза на наличие грозы (а), и успешности прогноза (б) после операции растяжения максимума.

таблицы можно также решить и обратную задачу о том, какой процент гроз по прогностическим данным используемой модели атмосферы приходится на то или иное значение параметра, характеризующего интенсивность конвекции, т.е., по сути, интенсивность грозы.

Таблица 1 – Площадь, покрываемая верным прогнозом, ошибками пропуска и перестраховки прогноза на наличие грозы

Диагностический параметр	<i>cor</i>	<i>ins</i>	<i>mis</i>	$P_{mis}$	$P_{ins}$
FAPE	1,9	20,2	2,4	38,3	7,4
CAPE	2,15	9,3	2,15	39,9	15,1
CPR	1,98	14,0	2,09	49,4	12,9
FAPE*	2,13	13,6	2,19	39,1	10,9
CAPE*	2,16	9,7	2,16	39,7	14,5
CPR*	1,99	9,4	2,1	49,4	16,9

Таблица 2 – Пороговое значение параметров, обеспечивающее заданную вероятность успешного прогноза грозы

Диагностический параметр	Обеспеченность успешного прогноза грозы (%)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
FAPE	21	9	4	3	2	1			
CAPE	1126	828	622	457	315	193	92	17	
CPR	2,4	1,1	0,5	0,2	0,05				
FAPE*	64	35	21	13	8	5	3	2	1
CAPE*	1514	1204	983	797	632	472	315	162	26
CPR*	5,6	4,0	2,8	2,1	1,4	0,8	0,3	0,05	

Примечание: звездочкой обозначены результаты после растяжение максимума.

**Выводы.** Согласно полученным статистическим результатам, мезомасштабная ДПЭ, выраженная посредством параметра FAPE, имеет сопоставимые показатели успешности с другими диагностическими параметрами, такими как CAPE и интенсивность конвективных осадков. Параметр FAPE описывает более узкий диапазон конвекции фронтального типа, что объясняет немного худшие показатели обобщенного сравнения. Также, реализация доступной потенциальной энергии фронтальной зоны часто происходит со значительным запозданием, достигающим 3–6 часов, порождая сдвиги взаимообусловленных очагов в пространстве, которые сложно адекватно учесть в расчете статистики оправдываемости. Даже примененная для этой цели операция растяжения максимума не может обеспечить надежного учета последствий смещения, поскольку не включает информацию о его направлении. Однако, результаты полученные благодаря применению операции растяжения максимума, указывают на имеющийся потенциал повышения статистических показателей FAPE (как прогностического параметра) при условии учета смещения воздушных масс.

В целом, результаты исследования подтверждают правильность и применимость общей концепции оценки запаса мезомасштабной ДПЭ, реализованной во фронтальном параметре FAPE. Мезомасштабная ДПЭ, выраженная этим параметром, может использоваться как предиктор фронтальной грозовой активности над сушей.

В перспективе исследований предполагается оценить зависимость между запасами мезомасштабной ДПЭ и углублением барических систем пониженного давления.

Авторы выражают свою искреннюю благодарность коллективу Мировой сети дальнего обнаружения гроз (World Wide Lightning Location Network, <http://wwlln.net>), в состав которой входят сотрудники более 50 университетов и научно-исследовательских институтов, за предоставленные данные о местоположении гроз, используемые в данной статье.

Авторы благодарят д.геогр.н Иванова С. В., за предоставление данных моделирования высокого пространственного разрешения (модель MM5), использованных при разработке метода оценки мезомасштабной составляющей доступной потенциальной энергии атмосферы.

### Список источников

1. *Lorenz E.N.* Available potential energy and the maintenance of the general circulation. // *Tellus*. – 1955. – Vol. 7. – P. 157–167.
2. *Лоренц Э.Н.* Природа и теория общей циркуляции атмосферы [пер. с англ.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 259 с.
3. *Moncrieff M.W., Miller M.J.* The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 1976. – Vol. 102. – P. 373–394.
4. Explanation of SPC severe weather parameters [Электронный ресурс] / *Tompson R.*: NOAA's National Weather Service – Storm Prediction Center. – URL: <http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/help/begin.html>
5. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология: [учебник для вузов]. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
6. *Пишняк Д.В., Івус Г.П., Шпиг В.М., Будак І.В.* Расчет доступной потенциальной энергии на основе данных региональной модели атмосферы WRF-ARW // *Український гідрометеорологічний журнал*. – 2010. – № 6. – С. 130–137.
7. *Keyser, D., Shapiro M.A.* A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones // *Monthly Weather Review*. – 1986. – Vol. 114. – P. 452–499.
8. *Roeder, W.P. Gall R.L.* Estimating the width of a typical cold front // *National Weather Digest*. – 1987. – Vol. 12, Iss. 4. – P. 17–19.
9. *Балабух В.А.* Межгодовая изменчивость интенсивности конвекции в Украине / Глобальные и региональные изменения климата / под ред. Шестоपालова В.М., Логинова В.Ф., Осадчего В.И., Полонского А.Б., Георгиевского В.Ю., Волощука В.М., Маргазиновой В.Ф., Баханова В.П., Краковской С.В., Набиванца Ю.Б. – К.: Ника-Центр, 2011. – С. 161–173.

**Мезомасштабна доступна потенційна енергія фронтального розділу як характеристика його конвективної та грозової активності**

**Пишняк Д.В., Івус Г.П., Шпиг В.М.**

*Запропонований параметр що характеризує запаси мезомасштабної складової доступної потенційної енергії фронтальної зони. Отримано статистичне підтвердження зв'язку запасу енергії фронту з грозовою активністю. Проведено співставлення оцінок діагностичної якості запропонованого параметру з деякими іншими параметрами, що можуть використовуватися для діагнозу та прогнозу активності конвекції на фронті.*

**Ключові слова:** доступна потенційна енергія, енергія нестійкості, фронтальна зона, конвекція, фільтрація, успішність прогнозу.

**Mesoscale available potential energy of frontal zone as a characteristic of its convection and thunderstorm activity**

**Pishniak D.V., Ivus G.P., Shpyg V.M.**

*The quantitative parameter characterizing mesoscale part of available potential energy in frontal zone is proposed. Statistical confirmation links between frontal energy budget and lightning activity are obtained. The results of quality estimation proposed parameter are compared with estimations for other parameters can be use for diagnostic and forecasting convection strength on the atmospheric fronts.*

**Key words:** available potential energy, energy of instability, frontal zone, convection, filtering, forecast success.