

Э.М. Эндреев, В.А. Шаповалов, А.А. Аджиева, Г.В. Куповых, В.В. Гривцов

**СУХИЕ ВТОРЖЕНИЯ В СРЕДНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ КАК ФАКТОР
ФОРМИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ НИСХОДЯЩИХ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ:
АНАЛИЗ И ДИАГНОСТИКА НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

На основе 34-летнего архива (1990–2023 гг.) данных аэрологического зондирования 11 станций юга России, материалов реанализа ERA5 проведён систематический климатологический анализ роли сухих вторжений в средней тропосфере (700–500 гПа) как предиктора опасных нисходящих конвективных потоков и микропорывов. Сформированы отдельные выборки из 268 верифицированных случаев сильных приземных шквалов конвективного происхождения (скорость ветра ≥ 25 м/с) и 1042 контрольных дней без опасного ветра при наличии грозовой активности. Установлено, что в дни со шквалами дефицит точки росы на 700 гПа в среднем превышает контрольные значения в 2,4 раза (18,3 против 7,7°C), тогда как CAPE в обеих группах статистически значимо не различается. Введён и апробирован такой диагностический показатель как индекс нисходящей конвективной энергии с учетом охлаждения за счёт испарения осадков в сухом среднем тропосферном слое (DCAPE_{dry}), представляющий собой произведение стандартного DCAPE на нормированный дефицит точки росы в слое 700–500 гПа. Показано, что DCAPE_{dry} при пороге ≥ 620 Дж/кг обеспечивает вероятность обнаружения шкала POD = 84% при доле ложных тревог FAR = 19%, что принципиально улучшает существующие диагностические подходы (DCAPE в изоляции: POD = 61%, FAR = 43%). Обсуждается роль испарительного охлаждения, механизмов генерации вихрей у поверхности и влияния орографии Предкавказья и северных склонов Большого Кавказа на интенсификацию нисходящих потоков. Орографические особенности (долинный фокусирующий эффект, фёновые зоны, конвергентные зоны на границе гор и равнин) систематически усиливают интенсивность нисходящих потоков, способствуя концентрации наиболее опасных шквалов в полосе от Нальчика до Ставрополя.

Сухие вторжения; нисходящий конвективный поток; шквал; микропорыв; DCAPE; дефицит точки росы; ERA5; испарительное охлаждение; юг России; Предкавказье; Большой Кавказ.

E.M. Andreyev, V.A. Shapovalov, A.A. Adzhieva, G.V. Kupovkh, V.V. Grivtsov

**DRY INTRUSIONS IN THE MIDDLE TROPOSPHERE AS A FACTOR IN THE
FORMATION OF DANGEROUS DOWNWARD CONVECTIVE FLOWS: ANALYSIS
AND DIAGNOSTICS IN THE SOUTH OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA**

A 34-year archive (1990–2023) of radiosonde data from 11 stations in southern Russia, ERA5 reanalysis is used to analyse mid-tropospheric dry intrusions (700–500 hPa) as a predictor of hazardous convective downdrafts, downbursts and microbursts. Separate samples of 268 verified cases of severe convective squalls (wind ≥ 25 m s⁻¹) and 1042 control thunderstorm days without damaging wind are compiled. Mean dewpoint depression at 700 hPa is 2.4 times higher in squall days than in controls (18.3 vs. 7.7°C), whereas CAPE shows no statistically significant difference between the two groups. A novel diagnostic parameter – Dry-Enhanced Downdraft CAPE (DCAPE_{dry}) – is derived as the product of standard DCAPE and the normalised dewpoint deficit in the 700–500 hPa layer. DCAPE_{dry} ≥ 620 J kg⁻¹ achieves POD = 84% and FAR = 19% in squall detection, markedly outperforming DCAPE alone (POD = 61%, FAR = 43%). The roles of evaporative cooling, surface vortex generation, and Ciscaucasian orography in downdraft intensification are discussed. Orographic features (valley focusing effect, foehn zones, and convergent zones at the border between mountains and plains) systematically increase the intensity of descending flows, contributing to the concentration of the most dangerous squalls in the area from Nalchik to Stavropol.

Dry intrusions; convective downdraft; squall; downburst; microbursts; DCAPE; dewpoint depression; ERA5; evaporative cooling; southern Russia; Ciscaucasia; Caucasus Major.

Введение. Опасные нисходящие конвективные потоки – микропорывы (microbursts, $d < 4$ км) и шквалы (downbursts, $d > 4$ км) – являются одними из наиболее трудно прогнозируемых и опасных явлений конвективного происхождения. По данным мировой статистики, около 25% авиационных катастроф в зоне конвективной погоды связаны именно с нисходящими потоками, а приземная скорость ветра в них нередко превышает 40–50 м/с, причиняя серьёзный ущерб инфраструктуре, сельскому хозяйству и лесному фонду [1, 2].

Физика формирования мощных нисходящих потоков принципиально отличается от физики восходящих конвективных течений. Если восходящий поток «питается» положительной плавучестью от конденсации водяного пара, то нисходящий обязан своей мощностью двум основным источникам отрицательной плавучести: силе тяжести, действующей на осадки, и испарительному охлаждению воздуха при прохождении гидрометеоров через сухие слои атмосферы [3, 4]. Именно второй механизм определяет экстремальные случаи: чем суше воздух под облаком или в промежуточных слоях, тем интенсивнее испарение и тем сильнее охлаждение, ведущее к развитию мощного нисходящего потока [5, 6].

В этом контексте вертикальное распределение влажности в тропосфере приобретает двойственное значение. При анализе восходящих потоков (что составляет основу большинства конвективных прогностических схем) сухой воздух в средней тропосфере традиционно рассматривается как ингибитор конвекции. Однако с позиции нисходящих потоков тот же сухой слой выступает как катализатор: осадки, попадающие в него, интенсивно испаряются, охлаждают воздух и формируют холодный, плотный и тяжёлый «пузырь», стремительно опускающийся к поверхности. Это противоречие – когда одна и та же атмосферная конфигурация одновременно подавляет восходящий поток и усиливает нисходящий – является фундаментальным и не находит отражения в стандартных оперативных прогностических индексах.

Юг европейской части России (регион Предкавказья и Северного Кавказа) представляет особый интерес для изучения данного явления. Регион характеризуется высокой повторяемостью сухих вторжений из Средиземноморья и Каспия, которые формируют характерный «загруженный» тип зондирования – влажный пограничный слой, перекрытый мощной сухой воздушной массой на уровнях 850–500 гПа [7, 8]. При прорыве ингибирующего слоя возникающие конвективные системы нередко сопровождаются катастрофическими шквалами, которые оказываются совершенно неожиданными для стандартных прогностических систем, ориентированных на доступную конвективную потенциальную энергию – Convective Available Potential Energy (CAPE) как основной параметр.

Настоящая работа ставит следующие задачи: провести анализ аэрологических характеристик, предшествующих опасным конвективным шквалам на юге России; количественно сопоставить влажностные профили в дни с шквалами и контрольных случаях; апробировать новый диагностический параметр индекс нисходящей конвективной энергии с учетом охлаждения за счёт испарения осадков в сухом среднем тропосферном слое ($DCAPE_{dry}$), явно учитывающий дефицит влажности в среднем тропосферном слое; исследовать физические механизмы усиления нисходящих потоков в условиях сухих вторжений применительно к орографически сложному региону Предкавказья и Большого Кавказа.

1. Физика нисходящих конвективных потоков и роль влажности. 1.1. Механизмы формирования шквалов. Нисходящий конвективный поток формируется в результате суммарного действия трёх сил: отрицательной плавучести охлаждённого воздуха, силы тяжести, действующей на гидрометеоры, и возмущения давления. Основным термодинамическим параметром, характеризующим потенциал нисходящего потока, является Downdraft CAPE (DCAPE) – интеграл отрицательной плавучести воздушного объема при опускании от уровня насыщения нисходящего потока (DSLFF) до поверхности:

$$DCAPE = \int_{z_s}^0 g \frac{T_{ve}(z) - T_{vp}(z)}{T_{ve}(z)} dz,$$

где T_{ve} – виртуальная температура окружающей среды, T_{vp} – виртуальная температура опускающегося объема воздуха, z_s – высота уровня DSLFF. Опускающийся объем изначально насыщен, он охлаждается по влажноадиабатическому градиенту до уровня конденсации нисходящего потока (DCL), затем – по сухоадиабатическому. Чем суше исходная воздушная масса и соответственно ниже точка росы, тем выше расположен DCL, и воздух суше – охлаждается по более крутому градиенту при последующем опускании, и тем больше DCAPE [5, 9].

Ключевым дополнительным механизмом является испарительное охлаждение. Когда осадки (дождь или крупа) попадают в слой сухого воздуха, значительная часть их массы переходит в пар. Согласно закону сохранения энергии, испарение 1 г воды погло-

щает примерно 2500 Дж теплоты, что соответствует охлаждению 1 кг воздуха приблизительно на 2,5°C. При интенсивных осадках (5–10 мм/ч) в очень сухом слое (дефицит точки росы $TD = 20\text{--}30^\circ\text{C}$) скорость испарительного охлаждения может достигать 5–10°C/км, создавая мощный источник отрицательной плавучести [6, 10]. Именно этот процесс превращает умеренный ливень в источник катастрофического шквала.

1.2. Сухое вторжение: концепция и региональная специфика. Сухое вторжение – это нисходящий поток сухого воздуха из верхней тропосферы или стратосферы, проникающий в среднюю тропосферу по потенциально-вихревым поверхностям вблизи вершин трогов и струйных течений [8, 11]. На синоптических диаграммах водяного пара (спутниковые каналы 6,2 и 7,3 мкм) сухие вторжения отчетливо видны как темные (холодные) языки, вторгающиеся в зону предфронтальной влажной конвекции [11].

Для Предкавказья характерны два основных вида сухих вторжений:

- ♦ Средиземноморский тип – сухой тёплый воздух, связанный с фёновыми процессами над горными системами и субтропическими антициклонами над Средиземноморьем, формирующий мощные инверсионные слои на уровнях 700–600 гПа с $TD > 15\text{--}20^\circ\text{C}$.

- ♦ Каспийский (континентальный) тип – сухой и горячий воздух из аравийско-иранских пустынь, поступающий в регион с востока-юго-востока, характеризующийся экстремально низкой влажностью ($RH < 15\%$ на 700 гПа) и $TD > 25^\circ\text{C}$. Оба типа создают термодинамически «заряженную» атмосферу с высоким потенциалом катастрофических нисходящих потоков при прорыве конвекции.

1.3. Индекс DCAPE с учётом охлаждения за счёт испарения осадков в сухом среднем тропосферном слое ($DCAPE_{dry}$). Стандартный DCAPE в условиях сухого воздуха – это ключевой метеорологический показатель для прогнозирования сильных, разрушительных шквалов и сухих микропорывов, но он не в полной мере отражает роль сухих слоёв в усилении нисходящих потоков: он вычисляется для репрезентативного объема воздуха из заданного слоя, при этом не учитывая интегральный дефицит влажности по всей толщине слоя, через который проходят осадки. С целью устранения данного ограничения предложен модифицированный показатель $DCAPE_{dry}$:

$$DCAPE_{dry} = \int_{z_s}^0 g \frac{T_{ve}(z) - T_{vp}^{eff}(z)}{T_{ve}(z)} dz,$$

$$T_{vp}^{eff}(z) = T_{vp}(z) - \gamma \cdot \overline{\Delta TD}_{mid} \cdot \frac{T_{ve}(z)}{T_{ve,cp}},$$

его можно представить иначе

$$DCAPE_{dry} = \int_{z_s}^0 g \frac{T_{ve}(z) - T_{vp}(z)}{T_{ve}(z)} (1 + k \cdot \overline{\Delta TD}_{mid}) dz,$$

или

$$DCAPE_{dry} = DCAPE \cdot (1 + k \cdot \overline{\Delta TD}_{mid}).$$

где DCAPE – стандартное значение нисходящей конвективной потенциальной энергии (Дж/кг), $T_{vp}^{eff}(z)$ – эффективная виртуальная температура опускающейся частицы, γ – безразмерный коэффициент, $T_{ve,cp}$ – средняя виртуальная температура в слое, $\overline{\Delta TD}_{mid}$ – среднее значение дефицита точки росы в слое 500–700 гПа ($^\circ\text{C}$), $k = 0,042\ ^\circ\text{C}^{-1}$ – эмпирически подобранный коэффициент (его значение оптимизировалось методом логистической регрессии на обучающей выборке из 180 случаев за 1990–2010 гг. с последующей проверкой на независимой выборке 2011–2023 гг.). При $\overline{\Delta TD}_{mid} = 0$ формула вырождается в стандартный DCAPE. При $\overline{\Delta TD}_{mid} = 20^\circ\text{C}$ поправочный множитель составляет 1,84 – т.е. фактическая энергия нисходящего потока почти вдвое превышает оценку по стандартному DCAPE.

Физический смысл поправки: чем больше дефицит влажности в слое, через который проходят осадки, тем интенсивнее испарительное охлаждение, тем выше отрицательная плавучесть, не учитываемая стандартным DCAPE, который строится для изначально насыщенного объема воздуха.

2. Данные и методология. 2.1. Исходные данные. Аэрологическое зондирование. Использованы данные стандартного радиозондирования (сроки 00 и 12 UTC) с 11 станций юга России и Северного Кавказа: Ростов-на-Дону (WMO 34731), Краснодар (34941), Ставрополь (37228), Нальчик (37011), Минеральные Воды (37054), Грозный (37089), Элиста (34812), Волгоград (34731), Астрахань (35121), Анапа (33976), Сочи (37597) за период 1990–2023 гг. (всего 247 400 зондирований). Архив получен из глобального хранилища IGRA v2 (NOAA NCEI) с процедурой контроля качества (удаление зондирований с более чем 20% пропущенных данных в ключевых слоях).

Реанализ ERA5 использовался для восстановления полей, недоступных из дискретных зондирований: горизонтальный ветер, геопотенциал, поля CAPE, DCAPE, PWAT с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (почасово). Точность ERA5 в воспроизведении DCAPE оценивалась сравнением с рассчитанными по зондированиям значениями; RMSE составил 89 Дж/кг (относительная ошибка ~18%), что сопоставимо с другими оценками для умеренных широт [12–14].

Архив опасных явлений. Случаи приземных шквалов конвективного происхождения (скорость ветра ≥ 25 м/с) идентифицированы на основе: базы данных опасных явлений Росгидромета за 1990–2023 гг.; архива ВГИ (Нальчик) [15]; данных сети метеостанций (автоматических и ручных наблюдений). Отбирались только случаи с подтверждённой конвективной природой шквала наличие грозы и/или крупы и с доступным радиозондом не позднее чем за 3 ч до события [16, 17]. Итоговая выборка: 268 шквалов. Контрольная выборка: 1042 дня с зарегистрированной грозой, но без приземного ветра ≥ 25 м/с.

2.2. Методология анализа. Климатологический анализ проводился по следующей схеме:

- ♦ Для каждого зондирования обеих выборок рассчитывался полный набор термодинамических индексов: CAPE (Surface-Based, SB-CAPE), CIN, LCL, LFC, DCAPE, К-индекс, дефицит точки росы на 700 гПа (TD700), средний дефицит точки росы в слоях 850–700 гПа и 700–500 гПа, высота нулевой изотермы (H_{FZ}), интегральное влагосодержание (PWAT).

- ♦ Вычислялась статистика распределений (медиана, квантили 25-й и 75-й, критерий Манна–Уитни для проверки статистической значимости различий). (3) Проводился корреляционный анализ (рангового Спирмена) между параметрами влажности и интенсивностью зафиксированных нисходящих потоков (максимальная приземная скорость ветра).

- ♦ Методом ROC-анализа оценивалось прогностическое качество различных индексов и пороговых критериев для обнаружения опасного шквала.

- ♦ Дополнительно построены составные (композиционные) карты полей ERA5 для сухих вторжений обоих типов.

3. Результаты. 3.1. Анализ термодинамических профилей. Сравнение медианных значений термодинамических параметров в выборках шквалов и контрольных дней выявило ряд принципиальных различий (табл. 1). Наиболее выраженное статистически значимое ($p < 0,001$ по критерию Манна–Уитни) различие зафиксировано именно в показателях влажности средней тропосферы. В частности, медианный дефицит точки росы на уровне 700 гПа составил 18,3°C для случаев со шквалом против 7,7°C в контроле – разница в 2,4 раза. Аналогичная картина наблюдается для среднего дефицита в слое 700–500 гПа (20,1 против 9,4°C).

Таблица 1

Медианные значения (квартили 25%–75%) термодинамических параметров в выборках шквалов и контрольных дней (11 станций, 1990–2023 гг.)

Параметр	Шквалы (N=268)	Контроль (N=1042)	p-знач. МУ
SB-CAPE, Дж/кг	1740 (1220–2410)	1890 (1340–2570)	0,087
CIN, Дж/кг	–58 (–95–28)	–31 (–52–14)	< 0,001
LCL, м	960 (780–1180)	880 (720–1080)	0,012
TD на 700 гПа, °C	18,3 (12,6–24,7)	7,7 (4,2–12,1)	< 0,001

Окончание табл. 1

Параметр	Шквалы (N=268)	Контроль (N=1042)	р-знач. МУ
TD ср. 700–500 гПа, °C	20,1 (15,4–26,2)	9,4 (5,8–14,3)	< 0,001
RH на 700 гПа, %	28 (18–38)	62 (48–73)	< 0,001
PWAT, мм	34,2 (28–41)	38,6 (33–45)	0,003
DCAPE, Дж/кг	680 (490–920)	290 (170–440)	< 0,001
DCAPE_{drv}, Дж/кг	1120 (740–1680)	340 (190–520)	< 0,001
Высота нулевой изот., м	2340 (1980–2710)	2180 (1840–2540)	0,021
К-индекс	24 (18–30)	31 (24–38)	< 0,001

МУ – тест Манна–Уитни для независимых выборок; TD – дефицит точки росы ($T - T_d$).

Показательно и то, что параметры энергии неустойчивости (SB-CAPE) и пограничного слоя (LCL, LFC) в двух выборках не демонстрируют статистически значимых различий: медианный CAPE для дней со шквалом (1740 Дж/кг) оказывается несколько ниже, чем в контроле (1890 Дж/кг), что на первый взгляд выглядит парадоксально. Однако этот результат полностью согласуется с концепцией «заряженной» атмосферы: высокий CAPE в условиях сухих вторжений реализуется во взрывную конвекцию, которая затем генерирует мощные нисходящие потоки за счёт испарительного охлаждения в том же сухом слое. Напротив, в дни с более влажной средней тропосферой CAPE реализуется более постепенно, а испарительное охлаждение под облаком незначительно.

Здесь следует отметить, что К-индекс, широко используемый синоптиками, для дней со шквалом ниже, чем в контроле (24 против 31), поскольку высокий дефицит точки росы на 700 гПа входит в формулу К-индекса со знаком минус, именно низкий К-индекс в данном контексте указывает на высокий потенциал опасных нисходящих потоков.

3.2. Стратификация случаев по типу сухого вторжения. Из 268 случаев шквалов 147 (54,9%) были классифицированы как связанные со Средиземноморским типом сухих вторжений (на основе ERA5-траекторного анализа и спутниковых карт водяного пара), 96 (35,8%) – с Каспийским (континентальным) типом, 25 (9,3%) – с вторжениями иного происхождения (арктические, местные термически генерируемые). Наиболее высокая максимальная скорость приземного ветра зафиксирована при Каспийском типе (медиана 34,2 м/с), что объясняется экстремально низкой относительной влажностью воздуха (медиана RH на 700 гПа = 12%) и соответственно максимальным испарительным охлаждением.

Таблица 2

Основные характеристики шквалов по типу сухого вторжения

Характеристика	Средиземноморский (N=147)	Каспийский (N=96)	Иные (N=25)
Медиана скорости ветра, м/с	28,4	34,2	26,1
TD на 700 гПа, °C	16,8	23,2	11,4
RH на 700 гПа, %	31	12	48
DCAPE_{drv}, Дж/кг	1050	1480	620
CAPE, Дж/кг	1680	1560	1920
Повторяемость в тёплый сезон, %	61	83	44
Время суток: доля ночных случаев, %	24	38	29

3.3. Корреляционный анализ. Матрица ранговых корреляций (Спирмена) между основными термодинамическими параметрами и максимальной зафиксированной скоростью приземного ветра (на основе объединённой выборки 268 шквалов) представлена в табл. 3. Наиболее высокий коэффициент корреляции с интенсивностью шквала демонстрирует $DCAPE_{dry}$ ($\rho = 0,74$), тогда как стандартный $DCAPE$ ($\rho = 0,61$) и TD на 700 гПа ($\rho = 0,58$) также статистически значимы, но менее информативны. Стандартный $CAPE$ практически не коррелирует с интенсивностью приземного ветра ($\rho = 0,09$, $p = 0,14$).

Таблица 3

Ранговые корреляции Спирмена (ρ) между термодинамическими параметрами и максимальной скоростью приземного ветра при шквале ($N=268$)

Параметр	ρ	p -значение
$DCAPE_{dry}$	0,74	< 0,001
$DCAPE$	0,61	< 0,001
TD на 700 гПа (дефицит т. р.)	0,58	< 0,001
TD ср. 700–500 гПа	0,55	< 0,001
RH на 700 гПа (обратная)	–0,52	< 0,001
Высота нулевой изотермы	0,38	< 0,001
$PWAT$ (обратная)	–0,31	< 0,001
$SB-CAPE$	0,09	0,14
K -индекс (обратная)	–0,44	< 0,001

Курсивом выделены корреляции с $p \geq 0,05$ (статистически незначимые); все остальные значимы при уровне 0,001.

3.4. Прогностическое качество индексов: ROC-анализ. Оценка качества прогноза различных индексов при разграничении случаев со шквалом и контрольных дней выполнена методом ROC-анализа. Для каждого индекса варьировался пороговый критерий, и строилась зависимость вероятности обнаружения ($POD = TP/(TP+FN)$) от доли ложных тревог ($FAR = FP/(FP+TN)$). Площадь под кривой ROC (AUC) использовалась как интегральная мера прогностической способности.

Таблица 4

Качество прогноза диагностических параметров при разграничении шквалов (≥ 25 м/с) и контрольных дней на независимой выборке 2011–2023 гг.

Параметр / критерий	Порог	POD , %	FAR , %	CSI , %	AUC
$SB-CAPE > 1500$ Дж/кг	>1500	52	51	34	0,56
K -индекс < 20	<20	58	47	38	0,63
$DCAPE > 400$ Дж/кг	>400	61	43	42	0,68
$TD_{700} > 12^\circ C$	>12	69	36	49	0,74
$DCAPE + TD_{700}$ (линейн.)	—	76	31	57	0,81
$DCAPE_{dry} \geq 620$ Дж/кг	≥ 620	84	19	70	0,89

POD = True Positive Rate; FAR = False Alarm Rate; CSI = Critical Success Index = $TP/(TP+FP+FN)$.

ДСАРЕ_{dry} с порогом ≥ 620 Дж/кг обеспечивает $AUC = 0,89$ – наилучший результат среди протестированных параметров. Для сравнения: стандартный ДСАРЕ с оптимальным порогом 400 Дж/кг даёт $AUC = 0,68$ (разность статистически значима при $p < 0,01$ по тесту ДеЛонга). Комбинированный линейный показатель (ДСАРЕ + TD₇₀₀) занимает промежуточное положение ($AUC = 0,81$), что подтверждает нелинейный, мультипликативный характер взаимодействия между потенциалом нисходящего потока и влажностью среды, адекватно воспроизводимый формулой ДСАРЕ_{dry}.

3.5. Пространственная изменчивость: роль орографии Предкавказья. Составные карты полей ERA5 (из 147 Средиземноморских случаев) на уровне 700 гПа демонстрируют устойчивый пространственный паттерн: ось максимального дефицита точки росы ($TD > 18^\circ\text{C}$) ориентирована с запада-северо-запада на восток-юго-восток, с максимальными значениями над Ставропольской возвышенностью и Кабардино-Балкарией. Это объясняется орографическим сжатием сухой воздушной массы над понижениями рельефа при сохранении её в верхних уровнях, а также нагревом воздуха при опускании – фёны на подветренных склонах Кавказа.

Данная структура приводит к пространственной концентрации наиболее опасных нисходящих потоков в «зоне аномалии» – вдоль полосы от Нальчика до Ставрополя и далее к Волгоградской области. Анализ архива шквалов подтверждает: 62% случаев Каспийского типа с наибольшей интенсивностью наблюдались именно в этой полосе. Это пространственное совпадение зон максимального дефицита влажности на 700 гПа и зон наибольшей повторяемости сильных шквалов является важным для регионального прогнозирования опасных явлений.

4. Физические механизмы усиления нисходящих потоков в условиях сухих вторжений. 4.1. Испарительное охлаждение: расчётные оценки. Для количественной оценки вклада испарительного охлаждения в развитие нисходящего потока проведены простые термодинамические расчёты при параметрах, характерных для Каспийского типа вторжений: интенсивность осадков 10 мм/ч, толщина сухого слоя 3 км, начальная $TD = 25^\circ\text{C}$ на уровне 700 гПа.

При данных условиях скорость испарительного охлаждения составляет около $6\text{--}8^\circ\text{C}/\text{км}$. Вертикальный интеграл дополнительного охлаждения по слою 3 км даёт около $20^\circ\text{C}\cdot\text{км}$, что при плотности воздуха $0,8 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $C_p \approx 1005 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ соответствует дополнительной отрицательной плавучести порядка 200–250 Дж/кг. Именно эта величина составляет разность между стандартным ДСАРЕ ($\sim 500\text{--}700$ Дж/кг при умеренной влажности) и ДСАРЕ_{dry} ($\sim 900\text{--}1200$ Дж/кг при экстремально сухом воздухе), что хорошо согласуется со статистическими данными из табл. 1 и объясняет физический смысл поправочного коэффициента k .

Результирующая скорость нисходящего потока у поверхности оценивается из соотношения $w_d \approx \sqrt{2 \cdot \text{ДСАРЕ}}$. Для стандартного ДСАРЕ = 600 Дж/кг это даёт $w_d \approx 35 \text{ м}/\text{с}$; для ДСАРЕ_{dry} = 1100 Дж/кг — $w_d \approx 47 \text{ м}/\text{с}$. Разница в 12 м/с вполне объясняет наблюдаемый в архиве разброс скоростей приземного ветра между «обычными» и наиболее опасными шквалами при схожих значениях ДСАРЕ.

4.2. Механизм генерации приземного вихря. Особую опасность нисходящие потоки представляют не только по скорости прямого удара о поверхность, но и через генерацию горизонтального вихря вблизи земли. При растекании холодного нисходящего потока по подстилающей поверхности формируется граница с сильным горизонтальным градиентом ветра и температуры. Вертикальное перемещение горизонтального вихря, ассоциированного с этой границей, может приводить к образованию смерча или, в менее выраженном виде, к генерации локальных вращательных движений, усиливающих разрушительное воздействие шквала.

Интенсивность генерации горизонтального вихря у поверхности пропорциональна горизонтальному градиенту плавучести. При более мощном испарительном охлаждении градиент плавучести между нисходящим потоком и окружающей тёплой воздушной массой выше, что усиливает и горизонтальный вихрь [18]. Данный механизм объясняет нередко наблюдаемую при шквалах Каспийского типа вращательную структуру приземного ветра, фиксируемую доплеровскими радарными.

4.3. Взаимодействие с орографией. В условиях Предкавказья нисходящие потоки дополнительно усиливаются орографически. Существуют три механизма. Первый: долинный фокусирующий эффект. При растекании холодного воздуха от центра конвективного процесса он нередко оказывается в долинах рек (Кубань, Кума, Терек, Сунжа), которые действуют как каналы, ускоряя поток и концентрируя его в узкое русло. Скорость ветра при выходе из ущелья может значительно превышать скорость на открытой равнине. Второй: горные фёны. В зонах с подветренными склонами (например, к северу от Эльбруса) нисходящий поток «суммируется» с местной фёновой циркуляцией, создавая исключительно сильные порывы. Третий: конвергентные зоны. На границах между горными и равнинными участками возникают зоны конвергенции потоков, усиливающие горизонтальные градиенты скорости ветра и его разрушительный потенциал [7, 15].

5. Сезонная и суточная изменчивость. 5.1. Сезонное распределение. Из 268 верифицированных случаев шквалов 91% приходится на тёплый период (апрель – сентябрь) с максимумом в июне – июле (48% всех случаев). Это соответствует максимальному проникновению сухих воздушных масс в среднюю тропосферу в летние месяцы и максимальной конвективной активности. Холодный период (октябрь – март) даёт лишь 9% случаев, причём они практически исключительно связаны со Средиземноморским типом вторжений.

Сезонная динамика $DCAPE_{dry}$ следует сезону конвективной активности: медиана растёт от 380 Дж/кг в апреле до 1380 Дж/кг в июле, затем снижается. Параллельно увеличивается TD на 700 гПа: от 9°C (апрель) до 22°C (июль), что отражает снижение влаги в континентальных воздушных массах в разгар лета. Это означает, что наиболее опасный период для нисходящих потоков данного типа июнь – август.

Таблица 5

Сезонная статистика $DCAPE_{dry}$ и дефицита точки росы TD_{700} в выборке шквалов (N=268)

Месяц	N случаев	Медиана $DCAPE_{dry}$, Дж/кг	Медиана TD_{700} , °C	Медиана V_{max} , м/с
Апрель	14	380	9,2	26,4
Май	29	680	13,8	27,1
Июнь	68	1180	20,4	31,2
Июль	61	1380	22,1	34,6
Август	52	1120	19,8	30,8
Сентябрь	24	640	12,1	27,3
Окт.–Март	20	310	8,8	25,7

5.2. Суточный ход. Суточный ход шквалов демонстрирует два пика: основной – в период 15:00–19:00 местного времени (52% случаев), связанный с максимумом дневного конвективного прогрева, и вторичный – в 22:00–02:00 (21% случаев), объясняемый развитием ночных мезомасштабных конвективных систем (МКС) и усилением низкоуровневых струйных потоков над сушей (Low-Level Jet, LLJ). Интересно, что ночные случаи (21% от общей выборки) характеризуются медианной $DCAPE_{dry}$ лишь незначительно ниже (970 против 1140 Дж/кг), что указывает на то, что ночные МКС в регионе нередко развиваются в обстановке сухих вторжений с высоким потенциалом нисходящих потоков, подпитываемых ночными LLJ.

6. Типичные случаи: синоптический анализ. 6.1. Случай 1: Шквал Каспийского типа, 15 июля 2021 г. Во второй половине дня 15 июля 2021 г. на территории Кабардино-Балкарии и Ставропольского края зафиксированы шквалы со скоростью ветра 38–42 м/с,

сопровождаясь уничтожением посевов и разрушением лёгких строений. К 12 UTC по данным зондирования Нальчик (12 UTC): SB-CAPE = 1480 Дж/кг, CIN = -72 Дж/кг, LCL = 1040 м, TD на 700 гПа = 28,4°C, RH на 700 гПа = 8%, DCAPE = 910 Дж/кг, DCAPE_{dry} = 1980 Дж/кг.

Карты реанализа ERA5 подтверждали присутствие мощного сухого вторжения Каспийского типа: суховей с RH < 10% на 700 гПа охватывал регион с востока. Зондирование имело классический вид: ниже 850 гПа – влажный (TD < 5°C), выше – крайне сухой воздух TD = 28–30°C. К-индекс = 16 легко пропустить угрозу. Однако DCAPE_{dry} = 1980 Дж/кг однозначно указывал на катастрофический потенциал нисходящих потоков. Прогноз на основе нового индекса, верно, идентифицировал ситуацию как чрезвычайно опасную.

6.2. Случай 2: Вводящий в заблуждение высокий CAPE без шквала, 22 июня 2019 г. Этот «контрпример» не менее ценен. 22 июня 2019 г. зондирование Ставрополь (12 UTC) показало: SB-CAPE = 3240 Дж/кг (максимально высокое значение), CIN = -15 Дж/кг (очень низкое подавление), LCL = 820 м. Казалось бы, идеальные условия для мощных гроз. Действительно, развились обширные грозовые системы. Однако шквалов ≥ 25 м/с зафиксировано не было: максимальная скорость ветра составила 12 м/с.

Дефицит точки росы TD на 700 гПа = 3,2°C это значит, что воздух на средних уровнях был практически насыщен влагой RH $\approx$ 88%. Испарительное охлаждение осадков было минимальным, что в сочетании с небольшим DCAPE = 180 Дж/кг и соответственно DCAPE_{dry} = 193 Дж/кг однозначно указывало на слабый потенциал нисходящих потоков. Несмотря на огромный CAPE, при котором все стандартные прогностические схемы предупреждали бы о «сильных грозах», однако реального ветрового ущерба не произошло. DCAPE_{dry} корректно обозначил ситуацию как «незначимую» с точки зрения шквала (193 Дж/кг $\ll$ 620 Дж/кг). Данный случай демонстрирует, почему CAPE сам по себе не может служить достаточным предиктором приземного ветра.

7. Обсуждение. 7.1. Парадокс «сухой атмосферы» и оперативный прогноз. Результаты настоящего исследования ставят под сомнение распространённую в оперативной практике логику: «высокий CAPE – сильные грозы со шквалами». Применительно к нисходящим конвективным потокам это утверждение не только не работает, но может вводить в заблуждение. Как показано выше, «идеально неустойчивая» и влажная атмосфера с CAPE > 3000 Дж/кг генерирует грозы, но не шквалы, тогда как «умеренно неустойчивая» и крайне сухая атмосфера с CAPE $\sim$ 1500 Дж/кг и TD₇₀₀ > 25°C может породить катастрофический шквал.

Этот парадокс объясним с позиций физики. Высокая влажность во всей толще тропосферы означает, что испарительное охлаждение минимально, нисходящие потоки слабые, и весь CAPE реализуется в мощные восходящие потоки (ливни, грозы, крупный град). Высокая CAPE при сухой среде на среднем уровне в тропосфере реализуется в более умеренные восходящие потоки так как часть энергии теряется на вовлечение, но зато нисходящие потоки аномально мощны. Таким образом, профиль влаги определяет предпочтительный канал реализации атмосферной неустойчивости.

Таким образом, анализ угрозы опасного ветра должен начинаться с проверки влажностного профиля на средних уровнях. Предложенный индекс DCAPE_{dry} формализует алгоритм и даёт единственный легко вычисляемый параметр.

7.2. Сравнение с исследованиями для других регионов. Полученные результаты хорошо согласуются с международными данными. В архиве смерчопасных случаев США [19] также установлена слабая корреляция CAPE с интенсивностью приземного ветра при высокая корреляция дефицита точки росы в слое 700–500 гПа. Прогностические системы Национальной метеорологической службы США (NWS) в зонах сухого климата (юго-западные штаты) давно применяют дефицит точки росы на 700 гПа в качестве основного параметра прогноза «dry microbursts» [20, 21]. Различие состоит лишь в характере фонового климата: если в засушливых американских штатах сухая средняя тропосфера является нормой, на юге России она носит эпизодический характер, что требует специфического регионального анализа, проведённого в данной работе.

Исследования для Европы [22] демонстрируют аналогичную роль средиземноморских сухих вторжений в формировании опасных конвективных систем над Балканами и Центральной Европой. Предложенная концепция $\text{DCAPE}_{\text{dry}}$ в принципе применима и для этих регионов, хотя калибровка коэффициента k может потребовать существенной адаптации к региону.

7.3. Ограничения и направления дальнейших исследований. Основным ограничением настоящей работы является опора на данные радиозондирования в стандартные синоптические сроки (00 и 12 UTC), которые могут не соответствовать моменту шквала. Учитывая суточный максимум конвективных событий в 15–19 ч местного времени, реальные профили влажности во время шквала могут отличаться от зондирований за 3–6 ч до события. Это источник случайной погрешности, снижающей возможно реальную прогностическую способность $\text{DCAPE}_{\text{dry}}$.

Следующим шагом является валидация индекса в конвективно-разрешающих модельных прогнозах (WRF с шагом 1 км) и в почасовых продуктах ERA5. Перспективным направлением представляется также включение дополнительных параметров – высоты нулевой изотермы (определяющей расстояние, на котором осадки начинают испаряться) и горизонтального сдвига ветра (влияющего на интенсивность линии шквалов) – в многопараметрический индекс с применением методов машинного обучения.

Заключение. На основе 34-летнего архива аэрологических данных, реанализа ERA5 и спутниковых профилей влажности для 11 станций юга России проведён систематический анализ роли сухих вторжений в средней тропосфере в формировании опасных нисходящих конвективных потоков. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

- ♦ Стандартный CAPE является неудовлетворительным предиктором интенсивности приземного шквала конвективного происхождения: коэффициент ранговой корреляции между CAPE и максимальной скоростью ветра составляет $\rho = 0,09$ (статистически незначимо), тогда как для $\text{DCAPE}_{\text{dry}}$ $\rho = 0,74$ ($p < 0,001$). Принципиальным диагностическим параметром является дефицит точки росы в слое 700–500 гПа: в дни со шквалами он в 2,4 раза выше, чем в контрольных грозовых ситуациях (18,3 против 7,7°C на 700 гПа).

- ♦ Разработан новый интегральный индекс $\text{DCAPE}_{\text{dry}} = \text{DCAPE} \cdot (1 + 0,042 \cdot \overline{\Delta T D}_{\text{mid}})$, физически обоснованный как нелинейная комбинация потенциала нисходящего потока и интенсивности испарительного охлаждения в сухом слое. При пороге ≥ 620 Дж/кг индекс обеспечивает $\text{POD} = 84\%$, $\text{FAR} = 19\%$, $\text{CSI} = 70\%$, $\text{AUC} = 0,89$ в задаче диагностики шквала, превосходя стандартный DCAPE ($\text{AUC} = 0,68$) и K-индекс ($\text{AUC} = 0,63$).

- ♦ Идентифицированы два основных типа сухих вторжений, наиболее значимых для региона: Средиземноморский (54,9% случаев, медиана $V_{\text{max}} = 28,4$ м/с) и Каспийский (35,8% случаев, медиана $V_{\text{max}} = 34,2$ м/с). Каспийский тип, характеризующийся экстремально низкой RH на 700 гПа (медиана 12%), порождает наиболее интенсивные шквалы и сопровождается наибольшими значениями $\text{DCAPE}_{\text{dry}}$.

- ♦ Орографические особенности Предкавказья (долинный фокусирующий эффект, фёновые зоны, конвергентные зоны на границе гор и равнин) систематически усиливают интенсивность нисходящих потоков, способствуя концентрации наиболее опасных шквалов в полосе от Нальчика до Ставрополя.

Внедрение $\text{DCAPE}_{\text{dry}}$ в оперативную практику аэрологической диагностики позволит существенно улучшить заблаговременность и достоверность предупреждений об опасных конвективных явлениях в регионе, особенно в условиях «сухой конвекции» с высоким CIN и умеренным CAPE, которые стандартные схемы систематически недооценивают.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернокульский А.В., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Ерошкина Н.А., Корнев Д.П., Быков А.В., Калинин Н.А., Курганский М.В., Павлюков Ю.Б., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Шквалы и смерчи на европейской части России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 11. – С. 71-90.

2. Proctor F.H. Numerical simulations of an isolated microburst. Part I: Dynamics and structure // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1988. – Vol. 45, No. 21. – P. 3137-3160. – doi: 10.1175/1520-0469(1988)045<3137: NSOAIM>2.0.CO;2.
3. Cholette M., Milbrandt J.A., Morrison H., Paquin-Ricard D., Jacques D. Combining Triple-Moment Ice With Prognostic Liquid Fraction in the P3 Microphysics Scheme: Impacts on a Simulated Squall Line // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2023. – Vol. 15, Issue 4. – e2022MS003328. – doi: 10.1029/2022MS003328.
4. Sun Y., Gao Q., Li H., Wang M. Evaluating Simulated Microphysics of Stratiform and Convective Precipitation in a Squall Line Event Using Polarimetric Radar Observations // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, Issue 6. – P. 1507. – doi: 10.3390/rs15061507.
5. Srivastava R.C. A Model of intense Downdrafts Driven by the Melting and Evaporation of Precipitation // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1987. – Vol. 44, No. 13. – P. 1752-1774. – doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<1752: AMOIDD>2.0.CO;2.
6. Lin J., Qian T., Bechtold P., Grell G. J., Zhang G. J., Zhu P., Freitas S.R., Barnes H., Han J. Atmospheric convection // Atmosphere-Ocean. – 2022. – Vol. 60, No. 3-4. – P. 422-476. – doi: 10.1080/07055900.2022.2082915.
7. Ларина О.Г., Бадахова Г.Х. Эволюция и траектории перемещения южных циклонов и их фронтальных разделов в условиях Северного Кавказа // Академическая публицистика. – 2022. – № 6-1. – С. 621-632.
8. Наурызбаева Ж.К., Холопцев А.В., Кенжина Ж.Х., Рахматулла Н.Е. Моделирование межгодовых изменений суммарной продолжительности гроз северной части Прикаспия, с учетом вариаций атмосферных осадков // Гидрометеорология и экология. – 2025. – № 4 (119). – С. 159-176.
9. Prein A.F. Thunderstorm straight line winds intensify with climate change // Nature Climate Change. – 2023. – Vol. 13, No. 12. – P. 1353-1359.
10. Wakimoto R.M. Convectively driven high wind events // Severe Convective Storms / ed. C.A. Doswell III. – Boston: AMS, 2001. – P. 255-298.
11. Hoskins B.J., McIntyre M.E., Robertson A.W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1985. – Vol. 111, No. 470. – P. 877-946. – doi: 10.1002/qj.49711147002.
12. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe // Monthly Weather Review. – 2017. – Vol. 145, No. 4. – P. 1507-1524. – doi: 10.1175/MWR-D-16-0384.1.
13. Susskind J., Barnett C.D., Blaisdell J.M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – Vol. 41, No. 2. – P. 390-409. – doi: 10.1109/TGRS.2002.808236.
14. Pougetchev N., August T., Calbet X. et al. IASI temperature and water vapor retrievals – error assessment and validation // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2009. – Vol. 9, No. 17. – P. 6453-6458. – doi: 10.5194/acp-9-6453-2009.
15. Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Уменьшение водных ресурсов региона как следствие деградации ледников Северного Кавказа под воздействием климатических изменений // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 1 (127). – С. 93-98.
16. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A., Boldyreff A.S. Development of thunderstorm monitoring technologies and algorithms by integration of radar, sensors and satellite images // Proc. SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII. – 2017. – 104240H (20 October 2017). – doi: 10.1117/12.2299289.
17. Adzhiev A.K., Adzhieva A.A. Spatial and temporal variations of thunderstorm activity in the Northern Caucasus // Russian Meteorology and Hydrology. – 2009. – Vol. 34, No. 12. – P. 789-793.
18. Rotunno R., Klemp J.B., Weisman M.L. A theory for strong, long-lived squall lines // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1988. – Vol. 45, No. 3. – P. 463-485. – DOI: 10.1175/1520-0469(1988)045<0463: ATFSLL>2.0.CO;2.
19. Romanic D., Taszarek M., Brooks H. Convective environments leading to microburst, macroburst and downburst events across the United States // Weather and Climate Extremes. – 2022. – Vol. 37. – P. 100474.
20. Atkins N.T., Wakimoto R.M. Wet microburst activity over the southeastern United States: Implications for forecasting // Weather and Forecasting. – 1991. – Vol. 6, No. 4. – P. 470-482. – DOI: 10.1175/1520-0434(1991)006<0470: WMAOTS>2.0.CO;2.
21. Williams I.N., Fieweger G.N. Mechanisms of projected changes in thunderstorm downburst environments across the United States // Geophysical Research Letters. – 2026. – Vol. 53, No. 1. – P. e2025GL117925.
22. Púčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M. Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in Central Europe // Monthly Weather Review. – 2015. – Vol. 143, No. 12. – P. 4805-4821. – DOI: 10.1175/MWR-D-15-0008.1.

REFERENCES

1. Chernokul'skiy A.V., Shikhov A.N., Azhigov I.O., Eroshkina N.A., Korenev D.P., Bykov A.V., Kalinin N.A., Kurganskiy M.V., Pavlyukov Yu.B., Sprygin A.A., Yarynich Yu.I. Shkvaly i smerchi na evropeyskoy chasti Rossii 15 maya 2021 g.: diagnostika i modelirovanie [Shkansky shafts and tornadoes in the European part of Russia on May 15, 2021: diagnostics and modeling], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2022, No. 11, pp. 71-90.
2. Proctor F.H. Numerical simulations of an isolated microburst. Part I: Dynamics and structure, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, Vol. 45, No. 21, pp. 3137-3160. doi: 10.1175/1520-0469(1988)045<3137: NSOAIM>2.0.CO;2.
3. Cholette M., Milbrandt J.A., Morrison H., Paquin-Ricard D., Jacques D. Combining Triple-Moment Ice With Prognostic Liquid Fraction in the P3 Microphysics Scheme: Impacts on a Simulated Squall Line, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2023, Vol. 15, Issue 4. e2022MS003328. doi: 10.1029/2022MS003328.
4. Sun Y., Gao Q., Li H., Wang M. Evaluating Simulated Microphysics of Stratiform and Convective Precipitation in a Squall Line Event Using Polarimetric Radar Observations, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, Issue 6, pp. 1507. doi: 10.3390/rs15061507.
5. Srivastava R.C. A Model of intense Downdrafts Driven by the Melting and Evaporation of Precipitation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, Vol. 44, No. 13, pp. 1752-1774. doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<1752: AMOIDD>2.0.CO;2.
6. Lin J., Qian T., Bechtold P., Grell G., Zhang G. J., Zhu P., Freitas S.R., Barnes H., Han J. Atmospheric convection, *Atmosphere-Ocean*, 2022, Vol. 60, No. 3-4, pp. 422-476. doi: 10.1080/07055900.2022.2082915.
7. Larina O.G., Badakhova G.Kh. Evolyutsiya i traektorii peremeshcheniya yuzhnykh tsiklonov i ikh frontal'nykh razdelov v usloviyakh Severnogo Kavkaza [Evolution and trajectories of the movement of southern cyclones and their frontal sections in the conditions of the North Caucasus], *Akademicheskaya publitsistika* [Academic Journalism], 2022, No. 6-1, pp. 621-632.
8. Naurozbaeva Zh.K., Kholoptsev A.V., Kenzhina Zh.Kh., Rakhmatulla N.E. Modelirovanie mezhdugodovykh izmeneniy summarnoy prodolzhitel'nosti groz severnoy chasti Prikaspiya, s uchedom variatsiy atmosferykh osadkov [Modeling of interannual changes in the total duration of thunderstorms in the northern part of the Caspian Sea, taking into account variations in precipitation], *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and Ecology], 2025, No. 4 (119), pp. 159-176.
9. Prein A.F. Thunderstorm straight line winds intensify with climate change, *Nature Climate Change*, 2023, Vol. 13, No. 12, pp. 1353-1359.
10. Wakimoto R.M. Convectively driven high wind events, *Severe Convective Storms*, ed. C.A. Doswell III. Boston: AMS, 2001, pp. 255-298.
11. Hoskins B.J., McIntyre M.E., Robertson A.W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, Vol. 111, No. 470, pp. 877-946. doi: 10.1002/qj.49711147002.
12. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe, *Monthly Weather Review*, 2017, Vol. 145, No. 4, pp. 1507-1524. doi: 10.1175/MWR-D-16-0384.1.
13. Susskind J., Barnett C.D., Blaisdell J.M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No. 2, pp. 390-409. doi: 10.1109/TGRS.2002.808236.
14. Pougetchev N., August T., Calbet X. et al. IASI temperature and water vapor retrievals – error assessment and validation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, Vol. 9, No. 17, pp. 6453-6458. doi: 10.5194/acp-9-6453-2009.
15. Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Umen'shenie vodnykh resursov regiona kak sledstvie degradatsii lednikov Severnogo Kavkaza pod vozdeystviem klimaticheskikh izmeneniy [Reduction of water resources of the region as a result of degradation of glaciers of the North Caucasus under the influence of climatic changes], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2023, No. 1 (127), pp. 93-98.
16. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A., Boldyreff A.S. Development of thunderstorm monitoring technologies and algorithms by integration of radar, sensors and satellite images, *Proc. SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII*, 2017, 104240H (20 October 2017). doi: 10.1117/12.2299289.
17. Adzhiev A.K., Adzhieva A.A. Spatial and temporal variations of thunderstorm activity in the Northern Caucasus, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, Vol. 34, No. 12, pp. 789-793.
18. Rotunno R., Klemp J.B., Weisman M.L. A theory for strong, long-lived squall lines, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, Vol. 45, No. 3, pp. 463-485. DOI: 10.1175/1520-0469(1988)045<0463: ATFSLL>2.0.CO;2.

19. Romanic D., Taszarek M., Brooks H. Convective environments leading to microburst, macroburst and downburst events across the United States, *Weather and Climate Extremes*, 2022, Vol. 37, pp. 100474.
20. Atkins N.T., Wakimoto R.M. Wet microburst activity over the southeastern United States: Implications for forecasting, *Weather and Forecasting*, 1991, Vol. 6, No. 4, pp. 470-482. DOI: 10.1175/1520-0434(1991)006<0470: WMAOTS>2.0.CO;2.
21. Williams I.N., Fieweger G.N. Mechanisms of projected changes in thunderstorm downburst environments across the United States, *Geophysical Research Letters*, 2026, Vol. 53, No. 1, pp. e2025GL117925.
22. Púčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M. Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in Central Europe, *Monthly Weather Review*, 2015, Vol. 143, No. 12, pp. 4805-4821. DOI: 10.1175/MWR-D-15-0008.1.

Эндреев Эльяс Маликович – Высокогорный геофизический институт; e-mail: eem507@bk.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 89287064453; аспирант.

Шаповалов Виталий Александрович – Высокогорный геофизический институт; e-mail: vet555_83@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 89280758034; с.н.с.; д.ф.-м.н.

Аджиева Аида Анатольевна – Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова; e-mail: aida-adzhieva@mail.ru; тел.: 89604279686; г. Нальчик, Россия; кафедра высшей математики и информатики; д.ф.-м.н.; профессор.

Куповых Геннадий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371636; кафедра физико-математических основ инженерного образования; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Гривцов Владимир Владиславович – Южный федеральный университет; e-mail: gvv@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; к.т.н.; доцент.

Andreyev Elias Malikovich – Vysokogorny Geophysical Institute; e-mail: eem507@bk.ru; Nalchik, Russia; phone: +79287064453; postgraduate student.

Shapovalov Vitaly Aleksandrovich – Vysokogorny Geophysical Institute; e-mail: vet555_83@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79280758034; dr. of phis. and math. sc.; senior researcher.

Adzhieva Aida Anatolyevna – V.M. Kokov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, KBR, Russia; e-mail: aida-adzhieva@mail.ru; phone: +79604279686; the Department of Higher Mathematics and Computer Science; dr. of phis. and math. sc.; professor.

Kupovkh Gennady Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371636; the Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education; head of department; dr. of phis. and math. sc.; professor.

Gritsov Vladimir Vladislavovich – Southern Federal University; e-mail: gvv@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371794; the Department of Engineering Graphics and Computer Design; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-272-282

А.В. Боженюк, И.А. Дубчак, О.В. Косенко

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОГО МЕТОДА TOPSIS ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТАКСИЧЕСКИ НЕЗАВИСИМЫХ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Неопределенные и неточные данные типичны для многокритериальных задач, поэтому теория нечетких множеств является адекватным инструментом для их решения. Цель данной работы – применить метод TOPSIS в нечеткой среде с использованием синтаксически независимых лингвистических переменных. Из-за частого появления нечетких понятий в данных для принятия решений, четких значений недостаточно для моделирования реальных ситуаций. В предлагаемом подходе оценка каждой альтернативы и вес каждого критерия выражаются синтаксически независимыми лингвистическими переменными, произвольные значения которых определяются через