

## **Сильные осадки средиземноморских циклонов над Россией и Украиной**

### **Введение**

Циклонические возмущения, зарождающиеся над Средиземноморьем и затем смещающиеся на Черное море и на территории Украины и России, являются частой причиной сильных дождей, снегопадов, гололеда и штормовых ветров в регионе. Во многих случаях эти циклоны отличаются небольшими размерами и очерчиваются одной – двумя изобарами, но при этом связанные с ними зоны осадков велики по площади и сохраняются в течение нескольких дней. Нередко на черноморском побережье выход южных циклонов вызывает наводнения и гололед, причиняющие большой ущерб. Эти процессы трудны для прогнозирования из-за малых размеров циклонов и их быстрого роста над морем.

Зарождение средиземноморских (южных) циклонов, по общему мнению (см. обзор [6]), обусловлено влиянием орографии и контрастов море-суша. В то же время связанные с ними зоны осадков далеко не всегда можно считать локальными или обусловленными орографией.

При достаточно высокой повторяемости (до 5 случаев в месяц [7]) южные циклоны остаются недостаточно изученными. Из климатологических и синоптических исследований [1,2,6,7] известно, что циклоны, смещающиеся затем на Украину и Россию, зарождаются преимущественно над северным Средиземноморьем (Лигурийское и Адриатическое моря), над Черным морем и Балканским п-овом. На стадии начального роста они испытывают сильное влияние неоднородности подстилающей поверхности, а их дальнейшая эволюция определяется характером тропосферной фронтальной зоны, обычно хорошо выраженной и глубокой.

С целью дальнейшего исследования средиземноморских циклонов в конце 90-х годов организован международный проект MEDEX (Mediterranean Experiment) под эгидой Всемирной Метеорологической Организации (ВМО). В круг задач этого проекта входит выяснение соотношения вкладов тропосферной динамики и локальных факторов в процессе эволюции циклонов. К решению этой задачи можно приблизиться как путем численного моделирования, так и путем диагностических расчетов по реальным данным. Набор диагностических характеристик, достаточно полно описывающий динамику процессов сеточного масштаба, может успешно использоваться для количественного описания факторов генерации осадков, в том числе и в южных циклонах. В [3] показано, на примере 9 южных циклонов (15 сроков) над Европейской Россией, что динамическое вынуждение (бароклинность, фронтальные поперечные циркуляции, конвективная неустойчивость) играет первостепенную роль в формировании зон осадков в южных циклонах. В сравнении с другими осадкообразующими системами над Европейским регионом, южные циклоны, согласно [3], отличаются исключительно интенсивным фронтогенезом и резкими контрастами свойств на фронтах.

В предлагаемой статье исследование динамики южных циклонов методом диагностических расчетов продолжено на данных за 1999-2001 гг.

Аналізу диагностических характеристик южных циклонов предпослан анализ связей этих характеристик с повторяемостью сильных осадков на европейской территории бывшего СССР в среднем за 4 сезона (зима, весна, лето) или за 3 сезона (осень) безотносительно к синоптической ситуации (раздел 3). Сильные осадки в южных циклонах рассмотрены затем в сравнении с указанными средними зависимостями между расчетными диагностиками и повторяемостью сильных осадков (раздел 4). В заключение дан анализ случая экстремально сильного гололедообразования на территориях Украины и Молдавии 25-30 ноября 2000 г.

## 1. Используемые данные

Для анализа использованы данные объективного анализа полей геопотенциала, температуры, влажности и ветра над Европейским регионом с декабря 1998 по май 2002 г., данные об осадках на станциях европейской территории бывшего СССР (ЕТС) за тот же период, а также данные о погоде ряда станций Украины за 25-30 ноября 2000 г. В выборку южных циклонов вошли возмущения, развитие которых сопровождалось сильными осадками на территории России и Украины. В течение 1999-2001 гг. отобрано 24 таких южных циклона. Из всех сроков, в течение которых на указанной территории существовали связанные с южными циклонами зоны сильных осадков, для анализа отобраны те, в которые над европейской территорией бывшего СССР не было других зон сильных осадков (связанных с какими-либо другими барическими системами). Этому условию удовлетворяют 35 сроков, для которых и проводились диагностические расчеты (звездочками помечены случаи, отнесенные к холодному периоду).

№ случая	Дата, срок (МСВ)	№ случая	Дата, срок (МСВ)
1	15.05.1999, 12	19	05.06.2001, 12
2	17.05.1999, 12	20	06.06.2001, 00
3	18.05.1999, 00	21	06.06.2001, 12
4	10.04.2000, 12	22	07.06.2001, 00
5	11.04.2000, 00	23	07.06.2001, 12
6	11.04.2000, 00	24	03.09.2001, 00
7	09.10.2000, 00	25	03.09.2001, 12
8	09.10.2000, 12	26	04.09.2001, 00
9*	10.01.2001, 00	27	04.09.2001, 12
10*	03.02.2001, 12	28	07.09.2001, 00
11*	04.02.2001, 00	29	07.09.2001, 12
12*	20.02.2001, 12	30	08.09.2001, 00
13*	27.02.2001, 12	31	08.09.2001, 12
14*	19.03.2001, 12	32*	24.12.2001, 00
15*	27.03.2001, 12	33*	24.12.2001, 12
16*	27.11.2000, 00	34*	25.12.2001, 00
17*	27.11.2000, 12	35*	25.12.2001, 12
18	05.06.2001, 00		

## 2. Рассчитываемые диагностические характеристики

Использовался тот же набор диагностических характеристик, что и ранее в [3], а именно:

- фронтальный параметр  $F$  (безразмерный), предложенный в [4] для целей объективного анализа фронтов и рассчитываемый по данным о приземном давлении, эквивалентной температуре на поверхностях 925, 850, 700 и 500 гПа, ветре и температуре на поверхности 850 гПа и высоте перечисленных поверхностей;

- скалярная фронтогенетическая функция  $G$  ( $^{\circ}\text{C}/(500 \text{ км} \cdot 12 \text{ ч})$ ) на поверхности 850 гПа как индикатор фронтогенеза (фронтолиза), с которым связаны поперечные вертикальные циркуляции в бароклинных зонах;

- уровень нулевой плавучести  $B$  (км) как характеристика конвективной неустойчивости;

- потенциальный вихрь  $q$  ( $\text{рву}$ ) и высота (гПа) динамической тропопаузы  $TR$ , отождествляемой с поверхностью  $q = 1 \text{ рву}$  [5].

### 3. «Фоновые» диагностические характеристики сильных осадков (средние за 1999-2002 гг.)

Поля F, G, B, q, TR, рассчитанные за 00 и 12 МСВ каждых суток с 1 декабря 1998 г. по 31 мая 2002 г. сопоставлялись с полями полусуточных сумм осадков, относящихся к соответствующему сроку. Если в квадрате географической сетки объективного анализа (2.5 x 2.5°) наблюдались сильные осадки хотя бы на одной из станций, то данный квадрат считался квадратом с сильными осадками. Сильными, согласно действующим стандартам, считаются осадки > 6 мм/12 ч в холодный сезон (твердые) и >14 мм/12 ч в теплый сезон (жидкие). Оценивалась информативность каждой величины как предиктора (в рамках концепции РР) осадков в градациях сильных и очень сильных. Всего за указанный период по сезонам наблюдались следующие количества случаев сильных осадков и их повторяемости:

4 весны ( всего 113152 квадрата, из них с сильными осадками 1057 квадратов, повторяемость сильных осадков 0.93%);

3 лета ( всего 81301 квадрат, с осадками 2752, повторяемость 3.38%);

3 осени ( всего 83029 квадратов, с осадками 1142, повторяемость 1.38%);

4 зимы ( всего 11022 квадрата, с осадками 3368, повторяемость 3.06 %).

Информативность диагностических величин оценивалась с помощью стандартного критерия Пирси-Обухова:

$$PI = [\varphi (\lambda - k) / \lambda (1 - k)],$$

где  $\varphi$  - предупрежденность прогноза наличия явления, т. е. количество предсказанных случаев его наличия в процентах от общего числа случаев наличия;  $\lambda$  - оправдываемость прогноза наличия явления;  $k$  – природная (здесь – выборочная) повторяемость явления. При  $PI > 0.25$  прогноз лучше случайного; на практике прогноз считается значимым при  $PI > 0.30$ .

Каждому значению D диагностической величины d можно поставить в соответствие значение PI, которое будет характеризовать эффективность прогноза явления (в данном случае – сильных осадков) на основе порогового значения D (например, при  $d \leq D$  прогнозируется наличие явления, при  $d < D$  – его отсутствие.) Аналогично, можно рассчитать PI для пары диагностических величин (что будет соответствовать эффективности прогноза по пороговым значениям двух предикторов) и для большего их числа.

В табл. 1 приведены PI для различных значений фронтального параметра F, если их брать в качестве пороговых для прогноза сильных осадков, по данным за 4 зимних сезона. Видно, что прогноз будет значимым в широком интервале значений F, используемых как пороговые. Эти прогнозы будут различаться по числу ложных тревог и непредсказанных явлений. Наилучшее соотношение этих двух типов ошибок соответствует максимуму PI, который, как видно из

Таблица 1

Распределение повторяемости осадков  $>6$  мм/12ч за четыре зимних сезона (в сумме за дневной и ночной сроки) в зависимости от фронтального параметра  $F$ , рассчитанного по данным объективного анализа

$F$	$\eta$	$\Delta S$	$\lambda$	$k_{out}$	$\varphi$	$\lambda/k$	PI
0	110222	100. 0	4.3	0.0	100. 0	1.00	0.00
5	69833	63.4	6.2	1.1	90.7	1.43	0.286
10	57083	51.8	7.3	1.2	86.7	1.67	0.365
15	48565	44.1	8.1	1.4	82.6	1.87	0.403
20	41285	37.5	9.2	1.5	78.8	2.10	0.432
25	34911	31.7	10.1	1.7	73.8	2.33	0.441
30	29771	27.0	11.1	1.9	68.8	2.55	0.437
35	25561	23.2	12.0	2.0	63.9	2.76	0.426
40	22166	20.1	12.8	2.2	59.1	2.94	0.407
45	19306	17.5	13.6	2.4	54.9	3.13	0.391
50	16910	15.3	14.3	2.5	50.5	3.29	0.368
55	14852	13.5	15.2	2.7	47.2	3.50	0.353
60	13067	11.9	16.0	2.8	43.6	3.68	0.332
65	11493	10.4	16.6	2.9	39.7	3.81	0.306
70	10113	9.2	17.2	3.0	36.4	3.96	0.284
75	8897	8.1	17.9	3.2	33.2	4.11	0.263
80	7786	7.1	18.4	3.3	29.9	4.23	-
85	6766	6.1	18.9	3.4	26.7	4.34	-
90	5877	5.3	19.6	3.5	24.0	4.50	-
95	4989	4.5	20.3	3.6	21.1	4.66	-
100	4158	3.8	21.6	3.7	18.8	4.98	-
105	3220	2.9	23.9	3.8	16.0	5.48	-
110	2828	2.6	24.3	3.8	14.3	5.59	-
115	2459	2.2	25.0	3.9	12.8	5.75	-
120	2094	1.9	25.7	3.9	11.2	5.92	-
125	1808	1.6	26.2	4.0	9.9	6.03	-
130	1516	1.4	26.5	4.0	8.4	6.08	-
135	1306	1.2	27.0	4.1	7.4	6.21	-
140	1115	1.0	27.3	4.1	6.3	6.27	-

Примечание.  $\eta$ ,  $\Delta S$  – число квадратов и доля площади региона внутри соответствующей изолинии  $F$ ,  $k_{out}$  - повторяемость осадков вне изолинии  $F$ ,  $\lambda/k$  - отношение повторяемости осадков внутри изолинии  $F$  к средней по выборке.

таблицы, получен при  $F = 25$ . Таким образом, по большой выборке данных – за 4 зимы, см. выше, - прогноз сильных осадков при  $F \geq 25$  будет наиболее эффективным:  $PI = 0.443$ , что вполне приемлемо с практической точки зрения.

В табл. 2 собраны максимальные  $PI$ , полученные для каждой из рассчитываемых диагностик ( $F$ ,  $TR$ ,  $G$ ,  $B$ ) и для их сочетаний за все сезоны. Из таблицы видно, что только две величины ( $F$  и  $B$ ) являются значимыми как единственный предиктор ( $PI > 0.3$  в диагональных клетках таблицы), причем  $B$  – незначимый предиктор зимой ( $PI = 0.109$ ), а  $F$  является значимым предиктором во все сезоны с наиболее высокими  $PI$  осенью (0.452) и зимой (0.443). Высота динамической тропопаузы незначима как единственный предиктор сильных осадков ( $PI$  от 0.052 до 0.104), так же как и фронтогенетическая функция  $G$  ( $PI$  от 0.124 до 0.220).

Эффективность парных сочетаний диагностик как предикторов сильных осадков, как видно из табл. 2, выше, чем у соответствующих одиночных диагностик. Наиболее эффективное сочетание предикторов ( $F$  и  $B$ ) обеспечивает  $PI$  от 0.420 летом до 0.535 осенью. На втором месте – сочетание  $F$  и  $G$  (от 0.325 летом до 0.485 осенью). Практически все парные сочетания, кроме  $TR$ ,  $G$  (и  $TR$ ,  $B$  в зимний сезон) обеспечивают значимый прогноз.

Таблица 2

Информативность PI диагностик как предикторов твердых осадков > 6мм/12ч  
и жидких > 14 мм/12ч по сезонам

	Выборка	K,%	F			TR			G			B		
			PI	φ	λ									
F	4 весны	0.93	0.373	0.723	0.019	0.389	0.659	0.022	0.400	0.733	0.020	0.474	0.695	0.029
	4 лета	3.38	0.316	0.651	0.054	0.319	0.659	0.054	0.320	0.646	0.055	0.436	0.737	0.067
	3 осени	1.38	0.452	0.788	0.032	0.477	0.754	0.037	0.485	0.751	0.038	0.035	0.808	0.040
	4 зимы	3.06	0.443	0.740	0.072	0.451	0.739	0.075	0.449	0.709	0.079	0.455	0.675	0.088
TR	4 весны	0.93				-	-	-	-	-	-	0.341	0.484	0.031
	4 лета	3.38				-	-	-	-	-	-	0.383	0.662	0.065
	3 осени	1.38				-	-	-	-	-	-	0.338	0.524	0.038
	4 зимы	3.06				-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	4 весны	0.93							-	-	-	0.397	0.658	0.023
	4 лета	3.38							-	-	-	0.397	0.687	0.065
	3 осени	1.38							-	-	-	0.403	0.589	0.042
	4 зимы	3.06							-	-	-	-	-	-
B	4 весны	0.93										0.330	0.578	0.133
	4 лета	3.38										0.364	0.694	0.059
	3 осени	1.38										0.334	0.546	0.035
	4 зимы	3.06										-	-	-

Примечание. Низкие (<0.25) значения PI не указываются. K - средняя выборочная повторяемость осадков указанных градаций.

Понижение PI летом по сравнению с другими сезонами объясняется увеличением вклада подсеточной конвекции. Интересно, что именно летом наиболее эффективен учет высоты тропопаузы: TR и B как пара предикторов обеспечивают именно летом максимальное PI = 0.361.

Используя пороговые значения не двух, а трех или четырех предикторов (нижняя часть табл. 2), удастся повысить эффективность разделения случаев наличия и отсутствия сильных осадков до PI = 0.636 (три осенних сезона, четыре предиктора). Из тройных сочетаний наиболее информативным оказалось F, G, B, как это и следовало ожидать по физическому

Обратим внимание на то, что использование фронтогенетической функции и высоты смысла предикторов; на втором месте F, TR, B.тропопаузы (диагностик, неэффективных как единственные предикторы) в качестве второго предиктора в сочетании с F или третьего предиктора в сочетании с F и B существенно повышает успешность разделения. С точки зрения физики процесса это естественно: поперечные циркуляции, эффекты которых описывают G и TR, развиваются и

вызывают осадкообразование именно в зонах атмосферных фронтов, индикатором которых и является F.

#### 4. Диагностические характеристики средиземноморских циклонов

Для выборки из 35 сроков со средиземноморскими циклонами (см. п. 1) проведены такие же диагностические расчеты, как и описанные в п. 3, и результаты сопоставлены с полями полусуточных сумм осадков. С помощью критерия Пирси-Обухова оценена успешность разделения случаев наличия и отсутствия сильных осадков по пороговым значениям одного, двух и более диагностик как предикторов. Результаты сведены в табл. 3 отдельно для теплого (22 срока) и холодного (13 сроков) сезонов. Холодным сезоном, т. е. сезоном с твердыми осадками, здесь считался период с ноября по март включительно. Всего выборка включает 5356 квадратов сетки, в том числе 244 с сильными осадками, выборочная повторяемость которых, таким образом, составляет 5.59%. Подчеркнем, что в п.3 и в данном разделе рассматривается одна и та же область – ЕТС.

Таблица 3

Информативность PI диагностик как предикторов твердых осадков > 6мм/12ч  
и жидких > 14 мм/12ч по сезонам для выборки южных циклонов  
(35 сроков, в том числе 13 – в холодный период; K=5.59%)

	Выборка	F			TR			G			B		
		PI	φ	λ									
F	Холодный период	0.566	0.813	0.164	0.609	0.848	0.174	0.606	0.866	0.165	0.600	0.821	0.121
	Теплый период	0.428	0.697	0.096	0.481	0.758	0.101	0.532	0.773	0.116	0.565	0.841	0.111
	Все случаи	0.478	0.787	0.108	0.513	0.799	0.118	0.535	0.791	0.128	0.560	0.811	0.133
TR	Холодный период				-	-	-	0.361	0.732	0.105	-	-	-
	Теплый период				-	-	-	0.317	0.652	0.074	0.468	0.735	0.101
	Все случаи				-	-	-	-	-	-	0.285	0.488	0.103
G	Холодный период							-	-	-	0.326	0.527	0.135
	Теплый период							-	-	-	0.495	0.765	0.104
	Все случаи							-	-	-	0.398	0.578	0.133
B	Холодный период										-	-	-
	Теплый период										0.435	0.758	0.088
	Все случаи										0.273	0.496	0.096

Три предиктора, все случаи

F, G, B			F, TR, G			F, TR, B			B, TR, G		
PI	φ	λ	PI	φ	λ	PI	φ	λ	PI	φ	λ
.636	0.861	0.154	0.619	0.861	0.145	0.622	0.848	0.152	0.476	0.787	0.108

Сопоставляя табл. 2 и 3, обнаруживаем, прежде всего, что значимые PI в соответствующих клетках табл. 3 значительно выше, чем в табл. 2 («холодному периоду» из табл. 3 естественно поставить в соответствие «4 зимы» из табл. 2). В холодный период высота уровня конвекции является незначимым единственным предиктором, как и в зимний сезон общей выборки табл. 2. Ее сочетания с другими предикторами также дают худшие результаты в холодный период, чем в теплый (кроме сочетания F, B).

Высокая успешность разделения случаев наличия и отсутствия осадков – более высокая, чем в среднем по большим выборкам за 2-3 сезона – была получена и в [3]. Подтверждается и еще один результат [3] – высокая информативность фронтогенетической функции в сочетании с другими предикторами. Очень высокие PI ( $> 0.5$ ) получены (см. табл. 3) для сочетаний F, B (0.560), F, G (0.535), F, TR (0.513). Это означает, что прогноз сильных осадков по пороговым значениям указанных пар предикторов будет не менее, а более эффективным в условиях выхода южных циклонов, чем в средних для региона условиях.

Сочетания трех предикторов (нижняя часть табл. 3) дают чрезвычайно высокие PI (до 0.692), а все четыре диагностики вместе дают рекордное значение  $PI = 0.751$ . В какой-то мере численное значение этого исключительно высокого PI можно отнести за счет эффектов малой выборки. Тем не менее результаты, представленные в табл. 3, в сравнении с хорошо статистически обеспеченными результатами табл. 2 и с более ранними результатами [3], приводят к следующему выводу.

Диагностические характеристики вынуждения осадков, имеющие сеточный масштаб, являются значимыми предикторами сильных осадков в южных циклонах, причем их эффективность как предикторов оказывается заметно выше для южных циклонов, чем в среднем по выборкам за 3-4 сезона над европейской территорией бывшего СССР. Это означает, что динамическое вынуждение сеточного масштаба играет определяющую роль в развитии и поддержании зон сильных осадков в южных циклонах. (Конвективную неустойчивость сеточного масштаба мы также относим к динамическим факторам вынуждения осадков.) В среднем по времени и территории, для осадкообразующих систем любого происхождения эта роль также является определяющей, как показано в п. 3 и ранее (на меньших выборках) в [3]. В особенности сильно выражены эффекты поперечных циркуляций на атмосферных фронтах (на что указывают высокие PI для сочетаний F, G или F, TR).

## 5. Катастрофический гололед в ноябре 2000 г.

Циклогенез над Средиземноморским бассейном в конце ноября 2000 г. сопровождался переохлажденными осадками на обширной территории Украины и Молдавии. Зона переохлажденного дождя сформировалась перед теплым фронтом циклона, центр которого смещался с Адриатического моря на Эгейское и затем на Черное, над которым он и заполнился. В рассмотренную в разделе 4 выборку южных циклонов включены два срока (00 и 12 МСВ 27 ноября), которым соответствуют наиболее интенсивные осадки за этот период.

Синоптическая ситуация в момент начала процесса характеризовалась глубокой ложбиной, ориентированной на юг и юго-восток со Скандинавии. Малоподвижный фронт в ее южной части располагался вдоль северного побережья Средиземного моря. 24 ноября над Лигурийским морем возникло циклоническое возмущение по типу Генуэзского циклона [1], просуществовавшее менее двух суток и заполнившееся над Балканским п-овом. Второй циклон обнаруживается в 00 МСВ 26 ноября над югом Адриатического моря и в дальнейшем смещается к востоку, оставаясь неглубоким (центр очерчивается изобарами 1005 и 1002.5 гПа), однако увеличиваясь в размерах. Внешняя замкнутая изобара 1015 гПа в 12 МСВ 27 ноября охватывала область размером около 1000 км в зональном и 800 в меридиональном направлении. В этот срок циклон прослеживался на поверхностях 850 и 700 гПа.

Образование гололеда началось ночью с 25 на 26 ноября на севере Одесской области, а к концу дня 26 ноября охватило 7 областей Украины (Одесскую, Николаевскую, Херсонскую, Черкасскую, Хмельницкую, Винницкую, Черновицкую) и Молдавию. На отдельных станциях этой территории явление продолжалось до 30 ноября. На станциях Одесской области 27 ноября замерзающий дождь достигал интенсивности 35-44 мм/12 ч при слабо-отрицательных температурах у поверхности Земли; позже он сменился замерзающей моросью. Диаметр отложений льда на проводах гололедного станка 27 ноября достигал 20-30 мм. В течение 28 и 29 ноября продолжалось выпадение переохлажденных осадков при температурах от 0 до  $-5^{\circ}\text{C}$ ,

диаметр отложений в Николаевской и Одесской областях увеличился до 40-56 мм, в Виннице и Умани – до 32 и 22 мм.

Гололед нанес большой экономический ущерб. В Одесской области железнодорожное движение было парализовано в течение нескольких суток, около 500 населенных пунктов было обесточено вследствие разрушения линий электропередач. Вышла из строя почти половина телефонной сети. Погибло около 10 тыс. га виноградников, большой ущерб нанесен садам и лесному хозяйству. Аналогичные разрушения имели место в Николаевской, Винницкой и Черкасской областях Украины.

Процесс формирования зоны переохлажденных осадков в этот период имел ряд характерных особенностей, делающих его чрезвычайно типичным, хрестоматийным процессом такого рода.

Как известно [8], «классический» механизм образования переохлажденных осадков представляется следующим образом. Твердые частицы осадков (кристаллы, снежинки), формирующиеся в облаке при отрицательной температуре, при своем падении попадают в теплый слой в нижней части облака или под ним, тают внутри этого слоя и продолжают падать как капли. Если под теплым слоем располагается слой холодного (морозного) воздуха, то эти капли в нем охлаждаются до отрицательных температур и выпадают на поверхность Земли как переохлажденный дождь, замерзая в момент выпадения.

Таким образом, наличие теплого слоя («теплого носа» на кривой стратификации) над и под холодными слоями является характерной особенностью классического механизма образования переохлажденного дождя. Появление «теплого носа» есть, как правило, результат интенсивной адвекции тепла в нижней тропосфере.

В изучаемом случае адвекция тепла была очень интенсивной на всей территории (до  $5 \cdot 10^{-5}$  °C /с на поверхности 850 гПа 27 ноября) и в достаточно мощном (более 1 км) слое. Продвижение воздуха с положительными температурами на территорию Украины в верхней части планетарного пограничного слоя хорошо прослеживается на рис. 1 б, в: в то время как на уровне 925 гПа (и у Земли) нулевая изотерма проходит даже 28 ноября в 00 МСВ почти по побережью Черного моря, на уровне 850 гПа она располагается на 200-300 км севернее. Таким образом, в этот срок теплый слой, даже по данным объективного анализа с его низким вертикальным разрешением, обнаруживается практически над всей территорией, пораженной гололедом. (На поверхности 700 гПа температуры над Украиной и Молдавией в течение всего периода составляли от -3 до -10°C.)

Над районом выпадения осадков 27 и 28 ноября располагалась очень резкая (до  $F = 180$ ) фронтальная зона, которая, по данным на поверхности 850 гПа, интенсивно обострялась (значения  $G$  достигали  $7^\circ\text{C}/(500\text{км}\cdot 12\text{ч})$ ). В пределах этой зоны синоптики различали два фронта: теплый южного циклона, более старую окклюзию. Оба были малоподвижными; контрасты температуры на теплом фронте, по наземным данным, 27 ноября достигали  $6-11^\circ\text{C}/100\text{км}$ .

Топография тропопаузы в период выпадения сильных осадков характеризовалась наличием воронки, в которой тропопауза опускалась ниже 500 гПа к востоку от зоны осадков, и куполом или гребнем тропопаузы (выше 300 гПа) над теплой воздушной массой.

Анализируемый процесс имеет все особенности, отмеченные выше (раздел 4) для средиземноморских штормов, приносящих сильные осадки на ЕС. Это наличие резко выраженной фронтальной зоны с большими  $F$ ; интенсивный фронтогенез на больших площадях (тогда как очаги фронтолиза невелики и малоинтенсивны); соседство воронки тропопаузы и ее купола. В то же время этот процесс дает яркий пример гололедообразования перед теплым фронтом, при адвекции теплого воздуха над холодным нижним слоем.

## Заключение

Диагностические характеристики динамического вынуждения сильных осадков в средиземноморских циклонах рассмотрены в сравнении со средними характеристиками осадков тех же градаций на европейской территории бывшего СССР, безотносительно к синоптической ситуации.

Показано, что, в среднем по большой выборке данных, фронтальный параметр  $F$  – основная характеристика динамического вынуждения – как единственный предиктор обеспечивает успешный ( $PI = 0.443$  при  $F = 25$ ) диагноз сильных осадков; высота уровня нулевой плавучести  $B$  также является значимым предиктором во все сезоны, кроме зимы. Наиболее информативное сочетание двух предикторов ( $F$  и  $B$ ) обеспечивает  $PI$  до  $0.535$ ; несколько худший, но также высокий  $PI = 0.485$  получен для сочетания  $F$ ,  $G$ , что указывает на важность учета характера эволюции фронта (фронтотенез или фронтотиз).

Связи между диагностическими характеристиками и повторяемостью сильных осадков в южных циклонах оказываются более тесными, чем в среднем по всем ситуациям (значения  $PI$  выше). Подтвержден полученный ранее в [3] вывод о высокой (выше, чем для средних условий) информативности фронтотенетической функции  $G$  как предиктора сильных осадков в южных циклонах.

Таким образом, диагностические характеристики динамического вынуждения, имеющие сеточный масштаб, являются значимыми предикторами сильных осадков в южных циклонах, причем их информативность (как единственных предикторов или в сочетаниях) значительно выше, чем в среднем по выборкам за 3-4 сезона. Это означает, что динамическое вынуждение сеточного масштаба играет определяющую роль в развитии зон сильных осадков как в среднем по времени на данной территории, так и в особенности в южных циклонах. Особенно сильно выражены эффекты поперечных циркуляций во фронтальных зонах.

В качестве примера рассмотрен случай катастрофического гололеда при выходе южного циклона с Адриатического на Черное море. Этот процесс отличается ярко выраженными, «хрестоматийными» чертами, характерными как для южных циклонов (чрезвычайно интенсивная фронтальная зона; очень сильный фронтотенез на больших площадях и соседство воронки тропопаузы с ее куполом как индикаторы глубоких поперечных циркуляций), так и для процесса гололедообразования (слабо-отрицательные температуры у поверхности Земли и положительные температуры в верхней части пограничного слоя при сильной адвекции тепла в зоне фронта и перед ним).

Практическая ценность диагностических характеристик вынуждения осадков применительно к южным циклонам особенно велика потому, что эти характеристики, рассчитываемые по данным объективного анализа или численного прогноза, выявляют хорошо очерченные зоны высокой вероятности осадков, в то время как сами южные циклоны могут быть неглубокими и иметь небольшие размеры. Даже в тех случаях, когда замкнутый центр циклона не виден в поле давления и проявляется лишь как ложбина над Черным морем, связанная в нем фронтальная зона (большие  $F$ ), области фронтотенеза (большие  $G$ ) и конвективной неустойчивости (большие  $B$ ) будут хорошо видны над той областью, где следует ожидать выпадения сильных осадков.

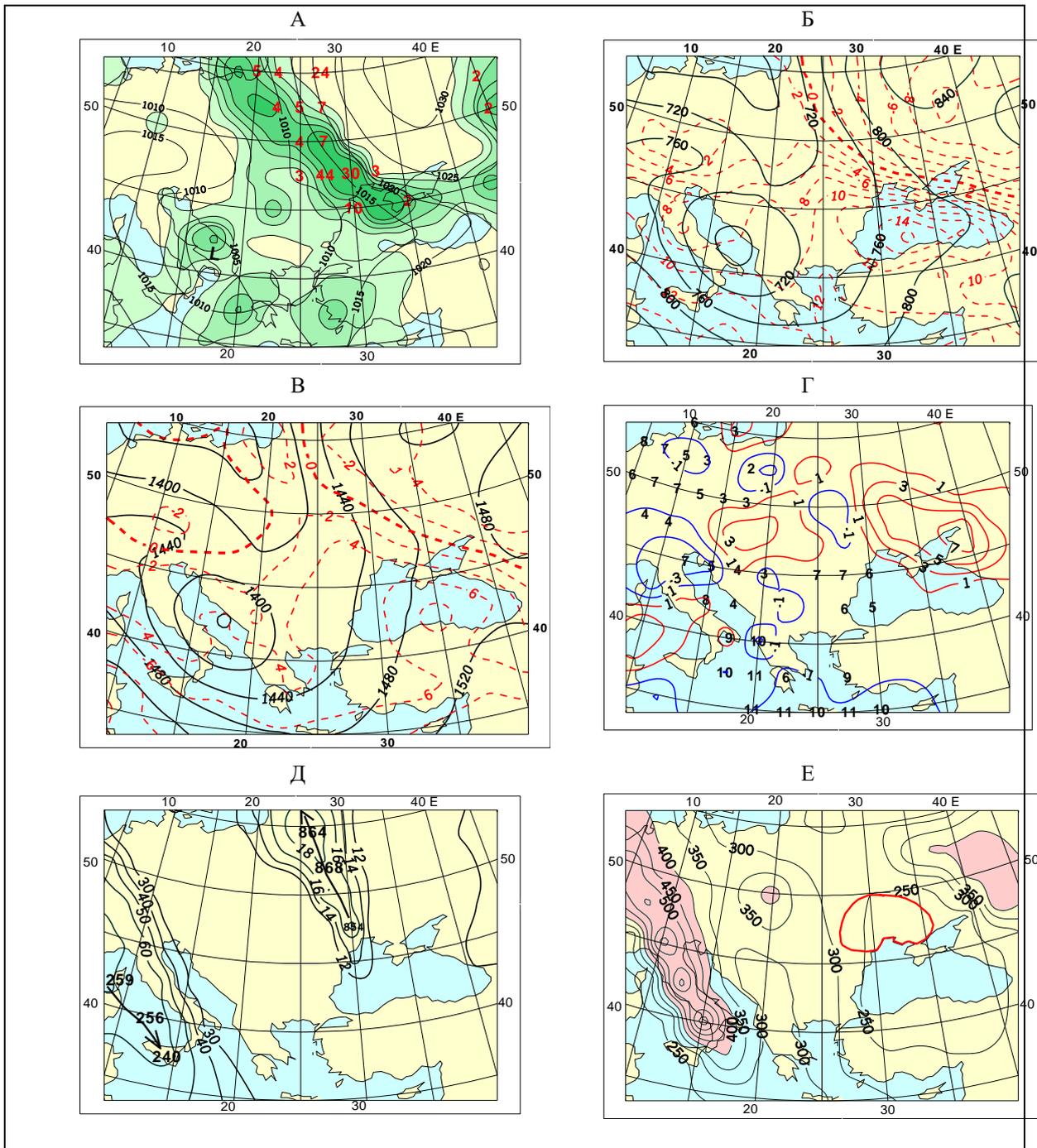


Рис.1. Случай обледенения на Украине 27 ноября 2000 г. 00 МСВ:

(а) зоны атмосферных фронтов ( $F > 20$ , закрашенные области), интенсивность осадков (мм/12 ч), показанная цифрами, и изолинии поля давления (гПа); (б) АТ925, изогипсы (гпм., сплошные) и изотермы ( $^{\circ}\text{C}$ , штриховые); (в) то же для АТ850; (г) изолинии фронтогенетической функции  $G$  ( $^{\circ}\text{C}/(500 \text{ км}\cdot 12\text{ч})$ ) и уровень нулевой плавучести (км); (д) верхнетропосферное (изотахи от 30 до 70 м/с) и нижнетропосферное (изотахи от 12 до 18 м/с) струйные течения, высота оси струи в гПа показана цифрами; (е) изолинии высоты тропопаузы (гПа, области ниже 400 гПа закрашены) и граница зоны обледенения (жирная линия).

## Список литературы

1. Campins J., A. Genoves, A. Jansa, J. A. Guijarro: Catalogation of cyclones in the western Mediterranean. INM/WMO Int. Symp. Cycl. Hazard. Weather in Mediterranean, Palma de Mallorca, Spain, 1997, 14-17 Apr, pp. 309-314.
2. Carlson, T. N. Mid-latitude weather systems. HarperCollins Acad., L., N.-Y., 1999, 507 pp.
3. Chakina, N. P., A. R. Ivanova, E. N. Skriptunova: Quantitative estimates of grid-scale forcing of heavy precipitation in the Mediterranean cyclones in Russia. Proc. 3<sup>rd</sup> EGS Plinius Conf., Oct., Baja Sardinia, Italy, 2001.
4. Chakina, N. P., E. N. Skriptunova, A. R. Ivanova: The atmospheric front objective analysis and estimation of its efficiency. Russian Meteorol. and Hydrol., 2000, № 7, pp. 5-16.
5. Hoinka, K.: Statistics of the global tropopause pressure. Mon. Weather Rev., 1998, 126, pp. 3303-3325.
6. Jansa A.: A general view about Mediterranean meteorology: cyclones and hazardous weather. INM/WMO Int. Symp. Cycl. Hazard. Weather in Mediterranean. Palma de Mallorca, Spain, 1997, 14-17 Apr., pp. 35-42.
7. Lepeshko, V. N.: On prediction of the southern cyclones. Russian Meteorol. and Hydrol., 1989, № 7, pp. 15 – 21.
8. Marwitz J., M. Politowich, B. Bernstein, F. Ralph, P. Neimann, R. Ashenden, J. Bresch: Meteorological conditions associated with the ATR72 aircraft accident near Roselawn, Indiana, on 31 October 1994. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1997, 78, pp. 41 – 52.