

Козаченко И.А., асп., Степаненко С.Н., к.г.н.
Одесский гидрометеорологический институт

Характеристики орографических вертикальных движений в районе Украинских Карпат

Рассматривается влияние орографии на формирование динамики нижнего слоя атмосферы над горными районами. Приводятся рассчитанные климатические характеристики второяемости орографических вертикальных движений в районе Украинских Карпат.

1. Постановка задачи.

Орографические вертикальные движения представляют собой мезомасштабные возмущения, генерируемые механическим обтеканием возвышенностей воздушным потоком. Основная суть механизма состоит в том, что воздушный поток, достигающий орографического препятствия, начинает тормозиться в своей нижней части, особенно при устойчивой стратификации воздушной массы. Это торможение приводит к блокированию, т.е. замедлению перемещения атмосферных возмущений перед горным хребтом. Наклонная поверхность горного хребта создаёт вынужденную конвекцию. Вынужденный подъём воздуха на наветренных склонах усиливает процессы конденсации (сублимации), в связи с чем вдоль этих склонов увеличивается мощность облаков и возрастает интенсивность осадков. Насыщенность воздуха водяным паром приводит к реализации механизма условной неустойчивости и появлению конвективных движений на наветренных склонах, даже если они отсутствовали в невозмущенном воздушном потоке перед препятствием. Конвективная неустойчивость существенно усиливает эффект общего орографического поднятия воздуха и приводит к выпадению интенсивных и неравномерных по площади осадков. Этот механизм реализуется на всех широтах и в любые сезоны года. При выпадении жидких осадков он приводит к возникновению паводков, а при выпадении твёрдых осадков - к катастрофическому росту снежного покрова в горах и последующему сходу снежных лавин.

При простейшем линейном рассмотрении задачи обтекания вынужденный подъём воздуха на наветренном склоне даётся простым соотношением

$$w_{op} = u_n \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где u_n - горизонтальный компонент скорости, нормальный к препятствию, а α - угол наклона горного хребта. Если трактовать угол α как средний наклон горной системы, то на масштабах порядка 100 км $\operatorname{tg} \alpha = O[10^{-2}]$ и для простой оценки мезомасштабного орографического возбуждения можно принять, что

$$w_{op} \approx u_n \alpha \quad (2)$$

Таким образом, в первом приближении интенсивность орографического возбуждения в данном районе пропорциональна скорости набегающего воздушного потока.

В общей постановке задачи скорость орографических вертикальных движений определяется как

$$w_{op} = -u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y}, \quad (3)$$

где u , v - составляющие скорости потока по осям x и y , соответственно, h - высота рельефа.

Приближенная количественная оценка вклада орографических эффектов в динамику процессов в АПС может осуществлена в рамках теории подобия (Баренблатт, 1982) и основана на анализе соотношения характерных масштабов величин, входящих в исследуемые уравнения. При использовании методики теории подобия в исследуемом уравнении осуществляется переход к новым безразмерным переменным типа $f_n = f/L_f$. Тогда исследование вклада каждого члена уравнения сводится к оценке размерного коэффициента, который стоит перед конкретным безразмерным членом уравнения, и состоящего из комбинации масштабов (L_f) величин, входящих в этот член уравнения.

Если ввести характерные масштабы пространственных размеров исследуемых процессов (L и H), характерные масштабы горизонтальной (U) и вертикальной (W) скоростей, характерный масштаб скалярной величины (Φ), то операторы горизонтальных пространственных производных в орографической системе координат (Степаненко, 1998)

$$\xi = x, \eta = y, \zeta = z - h, \quad (4)$$

где h - высота рельефа местности над уровнем подстилающей поверхности, можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{D_\Gamma(\varphi)}{Dx} &= \frac{\Phi}{L} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \xi_n} + G_1 \frac{\Phi}{H} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \zeta_n} = \frac{\Phi}{L} \left(\frac{\partial \varphi_n}{\partial \xi_n} + G_1 \frac{L}{H} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \zeta_n} \right), \\ \frac{D_\Gamma(\varphi)}{Dy} &= \frac{\Phi}{L} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \eta_n} + G_2 \frac{\Phi}{H} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \zeta_n} = \frac{\Phi}{L} \left(\frac{\partial \varphi_n}{\partial \eta_n} + G_2 \frac{L}{H} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \zeta_n} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Оператор деформации поля скорости запишем аналогично

$$\begin{aligned} D_\Gamma &= \frac{D_\Gamma(u)}{Dx} - \frac{D_\Gamma(v)}{Dy} = \frac{U}{L} \left[\frac{\partial u_n}{\partial \xi_n} - \frac{\partial v_n}{\partial \eta_n} + \frac{L}{H} \left(G_1 \frac{\partial u_n}{\partial \zeta_n} + G_1 \frac{\partial v_n}{\partial \zeta_n} \right) \right], \\ D_n &= \frac{D_\Gamma(v)}{Dx} + \frac{D_\Gamma(u)}{Dy} = \frac{U}{L} \left[\frac{\partial v_n}{\partial \xi_n} + \frac{\partial u_n}{\partial \eta_n} + \frac{L}{H} \left(G_1 \frac{\partial v_n}{\partial \zeta_n} + G_1 \frac{\partial u_n}{\partial \zeta_n} \right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $G_1 = -\frac{\partial h}{\partial x}$, $G_2 = -\frac{\partial h}{\partial y}$ - коэффициенты, характеризующие наклон рельефа по

осям X и Y , соответственно.

Таким образом, относительный вклад орографической составляющей в величину операторов горизонтальных производных и деформации поля скорости определяется значениями безразмерных критериев $\gamma_i = G_i L/H$ ($i = 1, 2$). Принимая характерные значения горизонтального масштаба $L = 50$ км и вертикального масштаба $H = 2$ км исследуемых мезомасштабных атмосферных процессов, получим значение параметров $\gamma_i = 25 G_i$.

Рассчитанные значения уклонов G_1 и G_2 для территории Украины в среднем имеют порядок 10^{-2} , достигая значений 10^{-1} , а в отдельных узлах 10^0 . Следовательно, параметр γ в среднем составляет 0.25, достигая 25 в отдельных узлах, т.е. вклад орографических составляющих в операторы горизонтальных производных и деформации скорости составляет в среднем 25%, достигая 100 и более процентов.

Оператор адвекции скалярной величины с помощью методики подобия запишем как

$$A(\varphi) = \frac{\partial(u\varphi)}{\partial\xi} + \frac{\partial(v\varphi)}{\partial\eta} + \frac{\partial(\tilde{w}\varphi)}{\partial\zeta} = \frac{\Phi U}{L} \left(\frac{\partial(u_n\varphi_n)}{\partial\xi_n} + \frac{\partial(v_n\varphi_n)}{\partial\eta_n} \right) + \frac{\Phi W}{H} \left(\frac{\partial(w_n\varphi_n)}{\partial\zeta_n} + \frac{W_{op}}{W} \frac{\partial((w_{op})_n\varphi_n)}{\partial\zeta_n} \right). \quad (7)$$

Здесь: $w_{op} = G_1 u + G_2 v$ - орографическая составляющая вертикальных движений, W_{op} - характерный масштаб орографических вертикальных движений.

Преобразуем выражение (7):

$$A(\varphi) = \frac{\Phi U}{L} \left[\frac{\partial(u_n\varphi_n)}{\partial\xi_n} + \frac{\partial(v_n\varphi_n)}{\partial\eta_n} + \frac{LW}{UH} \left(\frac{\partial(w_n\varphi_n)}{\partial\zeta_n} + \frac{W_{op}}{W} \frac{\partial((w_{op})_n\varphi_n)}{\partial\zeta_n} \right) \right]$$

Так как $\frac{W}{U} = \frac{H}{L}$, то коэффициент $\frac{LW}{UH} = 1$. Окончательно, можно записать:

$$A(\varphi) = \frac{\Phi U}{L} \left(\frac{\partial(u_n\varphi_n)}{\partial\xi_n} + \frac{\partial(v_n\varphi_n)}{\partial\eta_n} + \frac{\partial(w_n\varphi_n)}{\partial\zeta_n} + \frac{W_{op}}{W} \frac{\partial((w_{op})_n\varphi_n)}{\partial\zeta_n} \right). \quad (8)$$

Следовательно, относительный вклад орографической составляющей в оператор адвекции определяется параметром $\gamma_{op} = \frac{W_{op}}{W}$. Расчеты значений орографической составляющей вертикальной скорости w_{op} на основе детальных данных BADC об орографии Украины для ветров различных направлений (8 румбов) и скоростей (от 2 м/с до 15 м/с) показывают, что при умеренных ветрах (7-10 м/с) орографическая составляющая вертикальных движений в пределах Украины может достигать десятков см/с, что превосходит значения крупномасштабных вертикальных движений на один - два порядка.

Таким образом, из приведенных приближенных оценок, можно сделать вывод, что в данном регионе вклад орографических составляющих в формирование динамики нижней атмосферы является существенным и, следовательно, его необходимо учитывать при описании турбулентно-циркуляционного режима и процессов переноса и рассеяния примеси в пограничном слое атмосферы.

Входной информацией для расчёта орографических движений в соответствии с формулой (3) являются:

- данные о скорости и направлении воздушного потока в исследуемом регионе;
- детальные данные о рельефе местности этого региона.

В работе, используя климатические данные о повторяемости направлений и скоростей воздушного потока (Климатический справочник, 1982) были рассчитаны климатические характеристики орографических вертикальных движений в районе метеорологических станций Львов, Ужгород, Черновцы, Русская Мокра.

2. Физико-географическое описание исследуемого района

Карпатский регион не является однородным в физико-географическом отношении. Северная его часть располагается в лесостепной зоне Украины, в Западно-украинской провинции, отличающейся значительной лесистостью. В основе Волынской и западной части Подольской возвышенности находятся Волыно-Подольская плита, которая постепенно переходит на западе в Галицко-Волынскую впадину. Наибольшие высоты наблюдаются на северной окраине Подольской возвышенности - 450-470 м.

Центральная и южная часть региона - это Украинские Карпаты, являющиеся частью Карпатской горной системы, которая расположена на территориях Чехии, Словакии, Венгрии, Польши и Румынии. В пределах Украины простираются Восточные Карпаты, а именно горная система Лесистых Карпат до верховья реки Черемош). Вдоль внешней части Карпатской дуги простирается Предкарпатская возвышенность, вдоль внутренней части расположены Чоп-Мукачевская и Солотвинская впадины.

Для Украинских Карпат характерно продольно-зональное размещение основных структурно-орографических элементов, простирающихся с северо-запада на юго-восток. Северо-восточную полосу гор занимают Внешние Карпаты, состоящие из 8-10 хребтов высотами до 1800 м, вдоль фронта Внешних Карпат простирается зона краевого низкогорья высотой 600-800 м, создающая четко выраженный уступ к Предкарпатыю. Параллельно Внешним Карпатам простирается Водораздельно-Верховинская горная полоса с Верховинским хребтом и областями низкогорья Стрыйско-Санской верховины (600-700 м), Воловецко-Межгорской верховины, Ясинской котловины и Ворохта-Путильского низкогорья. Наиболее возвышенная часть Украинских Карпат - Полонинский хребет и горные группы Свидовец, Черногора, Гринявская и Лосовая, Раховский массив и Чичивцы. Здесь высоты превышают 1400-1500 м, в Черногорской группе - вершины Украинских Карпат - Говерла - 2061 м, Поп-Иван - 2022 м. Вдоль юго-западных склонов украинских Карпат простирается вулканический Выгорлат Гутинский (Ужгород-Хустский) хребет. Вдоль его юго-западных подножий простирается Закарпатская низменность, в её пределах поднимается Береговское вулканическое холмогорье.

Юго-западная область располагается, в основном за рубежом Украины, включая Семиградские Карпаты, Трансильванское плато и Румынские горы, а также Нижне-Дунайскую низменность.

3. Описание исходных данных и используемых методик

При решении поставленной задачи использовались климатические данные о повторяемости направлений и скоростей воздушного потока из Климатического справочника (Ветер, часть I).

Детальные данные об орографии исследуемого района были получены из Британского центра атмосферных данных (BADC) по сети Internet. Эти данные представляют собой значения высоты подстилающей поверхности $h(x, y)$ в узлах регулярной сетки с шагом 30'' (т.е. около 1 км).

Так как используется широтно-долготная расчётная сетка, то применяется сферическая система координат, в которой соотношение (3) можно записать как

$$w_{op} = u G_1 + v G_2, \quad (9)$$

где

$$G_1 = -\frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial h}{\partial \lambda}; \quad G_2 = -\frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (10)$$

где $a = 637 \cdot 10^6$ м - радиус Земли, θ - широта места, λ - долгота места.

Для конечно-разностной аппроксимации соотношения (10) применяется 9-точечный шаблон

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial h}{\partial \lambda}\right)_{i,j} &= \frac{h_{i+1,j} - h_{i-1,j}}{\Delta \lambda}; & h_{i,j} &= \frac{h_{i,j+1} + 2h_{i,j} + h_{i,j-1}}{4}; \\ \left(\frac{\partial h}{\partial \theta}\right)_{i,j} &= \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j-1}}{\Delta \theta}; & h_{i,j} &= \frac{h_{i+1,j} + 2h_{i,j} + h_{i-1,j}}{4}. \end{aligned} \quad (10)$$

Использование такого шаблона с одной стороны сгладить особенно резкие изменения высоты рельефа, а с другой стороны учесть влияние окружающего рельефа на формирование орографических движений.

4. Анализ результатов расчета

Рассмотрим некоторые климатические характеристики орографических вертикальных движений в районах ст. Львов, Ужгород, Черновцы, Русская Мокра, полученные по данным Климатического справочника (см. табл.1, 2).

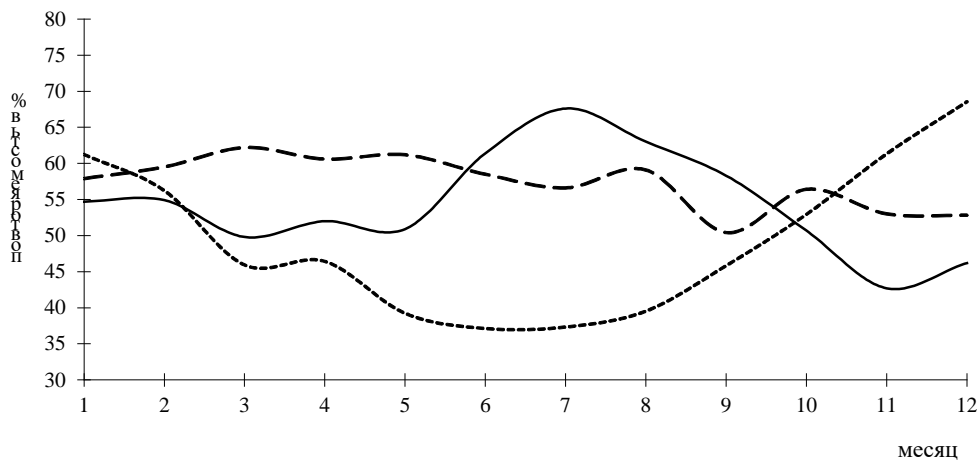


Рис. 1. Годовой ход повторяемости нисходящих вертикальных движений со скоростями до 10 см/с на ст. Львов (сплошная линия), Черновцы (прерывистая линия) и Ужгород (пунктирная линия)

Для станции Черновцы преобладают (во все месяцы года повторяемость больше 50%) нисходящие вертикальные движения со скоростями до 10 см/с. Вероятность больших скоростей только в феврале превышает 1% (см. рис. 1 и табл.1).

Вероятность значительных (скорость от 11 до 20 см/с) восходящих вертикальных движений также не превосходит 1% во все месяцы и близкая к 1% наблюдается также в феврале, когда в климатическом плане наибольшая вероятность значительных скоростей крупномасштабных атмосферных потоков.

Аналогичные закономерности свойственны и ст. Львов (см. рис. 1, табл.1 и 2).

На ст. Ужгород (см. рис. 1, табл.1) наблюдается более выраженный годовой ход орографических вертикальных движений. В осенне-зимний период (с октября по март) преобладают нисходящие вертикальные движения, а в весенне-летний - восходящие вертикальные движения. Причем, по климатическим данным в районе ст. Ужгород не наблюдаются орографические вертикальные движения со скоростями более 10 см/с (табл.2).

Таблица 1. Повторяемость по месяцам (в %) орографических вертикальных движений по градациям скорости

Гра- дация	Январь	Февр.	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сент.	Окт.	Ноябрь	Декабрь
	Черновцы											
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.1	1.45	0.6	0.55	0.35	0	0.05	0	0.15	0.3	0.7	0.1
3	57.9	59.5	62.2	60.65	61.25	58.55	56.6	59.05	50.45	56.45	53.0	52.85
4	41.4	37.7	36.5	38.5	38.2	41.3	43.15	40.45	48.95	43.05	45.75	46.35
5	0.65	0.95	0.75	0.35	0.2	0.2	0.25	0.5	0.45	0.25	0.55	0.75
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Львов											
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2.3	2.9	2.6	0.9	0.64	0.8	1.0	0.5	1.0	1.6	2.15	2.2
3	54.7	54.9	49.8	52.0	50.88	61.4	67.58	63.04	58.3	50.75	42.75	46.24
4	41.84	40.75	46.5	49.2	47.8	37.85	31.46	36.48	40.7	47.0	52.5	50.2
5	1.0	1.45	1.1	0.3	0.64	0	0	0	0.05	0.65	2.65	1.34
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ужгород											
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	61.2	56.2	45.9	46.4	39.25	37.1	37.3	39.55	45.8	52.95	61.3	68.5
4	38.7	43.8	54.1	55.6	60.7	62.8	62.7	60.45	54.2	47.1	38.7	31.45
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Русская Мокра											
1	22.3	21.5	20.8	16.6	19.3	18.5	15.0	14.8	17.4	20.6	20.7	21.7
2	1.5	1.9	1.8	2.3	1.7	1.8	1.3	1.3	1.0	1.4	2.4	1.7
3	14.3	14.4	17.6	19.2	22.8	22.0	21.8	18.7	16.9	15.9	18.4	16.7
4	10.3	9.9	7.0	6.1	5.5	4.0	5.6	4.1	5.6	5.5	5.9	7.8
5	11.3	9.8	9.7	10.4	11.7	13.1	14.5	18.9	17.5	13.4	14.1	13.3
6	40.3	37.8	43.1	45.4	39.0	40.6	41.8	42.2	41.6	43.2	38.5	38.8

Обозначения градаций: **1** — < - 0.2 м/с; **2** — -0.2 м/с ÷ -0.11 м/с; **3** — -0.1 м/с ÷ 0.0 м/с;
4 — 0.01 м/с ÷ 0.10 м/с; **5** — 0.11 м/с ÷ 0.2 м/с; **6** > 0.2 м/с)

Таблица 2. Ожидаемые орографические движения (по градациям скоростей табл.1) при различных направлениях и скоростях воздушного потока

Градация	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Русская Мокра								
1		6÷20	2÷20	0÷20	3÷20			
2		4÷5	0.1÷1		2÷3			
3		1÷3			0.1÷1			
4						0.1÷3		
5	0.1÷1					4÷5	0.1÷1	
6	2÷20					6÷20	2÷20	0.1÷20
Черновцы								
1		18÷20						
2	10÷20	10÷18	14÷20					
3	0.1÷9	0.1÷9	0.1÷13					0.1÷20
4				0.1÷20	0.1÷9	0.1÷9	0.1÷13	
5					10÷20	10÷17	14÷20	
6						18÷20		
Львов								
1								
2							14÷20	14÷20
3	0.1÷20					0.1÷20	0.1÷13	0.1÷13
4		0.1÷20	0.1÷13	0.1÷13	0.1÷20			
5			14÷20	14÷20				
6								
Ужгород								
1								
2								
3			0.1÷20	0.1÷20	0.1÷20	0.1÷20		
4	0.1÷20	0.1÷20					0.1÷20	0.1÷20
5								
6								

Наиболее сложная картина получена для ст. Русская Мокра (см. рис.2). Во-первых, в районе этой станции очень высока вероятность (60%-70%) очень больших вертикальных движений (со скоростями более 20 см/с) как восходящих, так и нисходящих. Это связано со значительными перепадами высот (уклонов местности) в районе станции. Так, осредненные по площади 9 км² уклоны G_1 и G_2 составляют в районе станции 237 м/км и 183 м/км соответственно.

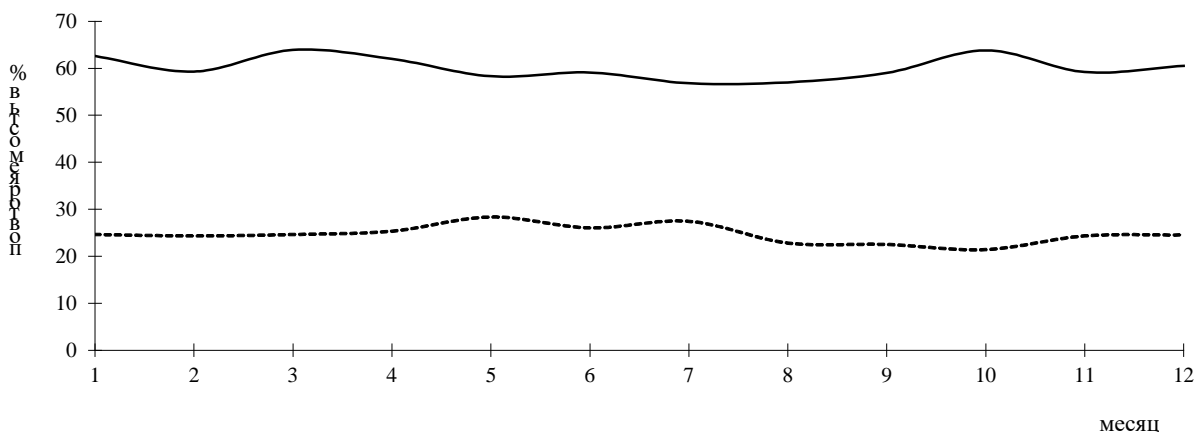


Рис. 2. Годовой ход повторяемости вертикальных движений на ст. Русская Мокра со скоростями более 20 см/с (сплошная линия) и и менее 10 см/с (пунктирная линия)

Во-вторых, в районе станции преобладают восходящие вертикальные движения со скоростями более 10 см/с во все месяцы. Их повторяемость колеблется от 47.6 % в феврале до 61.3 % в августе.

Известно, что станция Русская Мокра оказалась в эпицентре недавнего стихийного бедствия. Вероятно, одним из физических факторов, способствовавших развитию этих явлений, являются физико-географические особенности данной местности, формирующие интенсивные восходящие движения, а следовательно - и осадки.

Литература

1. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. - Л., Гидрометеиздат, 1982. -255 с.
2. Справочник по климату СССР. Украинская ССР. Вып. 10, часть III - Ветер. - Л., Гидрометеиздат, 1966. -250 с.
3. Степаненко С.Н. Динамика турбулентно-циркуляционных и диффузионных процессов в нижнем слое атмосферы над Украиной. – Одесса: Маяк, 1998. -286 с.

Characteristics of orographic vertical movements in the area of the Ukrainian Carpathians Kozachenko I.A, Stepanenko S.N.

The influence of orography on the formation of the dynamics of the lower layer of the atmosphere above mountain regions is considered. The calculated climatic characteristics of the recurrence of orographic vertical movements in the area of the Ukrainian Carpathians are given.

Метеорология, климатология и гидрология. Выпуск 36. 1999. стр. 3-16