

В.А. Ефимов, Г.П. Ивус, Е.Д. Хаджи-Страти

## **КУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И АТМОСФЕРНАЯ ТЕЛЕКОННЕКЦИЯ НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ**

Рассмотрены вопросы передачи импульсов от пространственно отдаленных источников в атмосферные процессы, происходящие над территорией Украины. Проведен анализ кумулятивных процессов и предложена гипотеза нового механизма телеконнекции.

### **Введение**

При составлении прогнозов погодообразующих макроциркуляционных образований замечено, что некоторые из них возникают за очень короткие сроки, так что нет возможности детально проанализировать их по данным срочных наблюдений. Это, как правило, кумулятивные процессы, многие из которых генерируются процессами, происходящими на очень большом расстоянии от объекта воздействия и передающими влияющий импульс посредством телеконнекции вплоть до географически отдаленных территорий. Например, на район Украины кумулятивно оказывают влияние импульсы от процессов, происходящих в полярных широтах южного полушария. Причем эта передача импульса происходит очень быстро. Вопросам телеконнекции уже посвящены исследования, например [5, 6, 8, 10], о влиянии течения Эль-Ниньо на погодные условия, проявляющиеся в отдаленных районах, вплоть до субполярных. Так как указанные процессы зачастую осуществляются между сроками метеорологических наблюдений, то до настоящего времени они почти не замечались прогнозистами, хотя погодные аномалии, внезапно вызванные возникшими кумулятивными процессами, часто ощутимо проявляют себя, влияя на хозяйственную деятельность. Это могут быть резкие шторма, сильные ливни или большие температурные отклонения от нормы. Хотя кумулятивные процессы в атмосфере рассмотрены в ряде работ [9, 12], большинство из них не отражает проблему в целом из-за отсутствия надежной информации, а при современном развитии спутниковых источников появляется возможность решения вопросов, связывающих кумулятивный циклоантициклогенез над Украиной и атмосферную телеконнекцию.

## Кумулятивный фронтогенез

Развитие кумулятивных процессов, в основном, происходит посредством взрывной реализации скрытой энергии фазовых переходов воды в атмосфере. Согласно [3], кумулятивный циклогенез является распространенным явлением в высоких широтах южного полушария. Например, при вторжении увлажненного муссонного тропического воздуха с приэкваториальных континентов южного полушария через обширные океанические акватории в высокие широты южного полушария и при его соприкосновении, с последующим смешением с холодным сухим континентальным воздухом Антарктиды, происходит мгновенная конденсация паров на довольно большой территории. Тепловая энергия, выделенная при конденсации, фактически мгновенно вызывает зарождение циклонического вихря, который, возникнув, создает штормовые условия в самых высоких широтах южного полушария и одновременно, посредством телеконнекции, передает механический импульс в отдаленные районы, в том числе, на территорию Украины. В данном случае приведен пример кумулятивного циклогенеза, который конкретно участвует в формировании погодных условий над Украиной, хотя источник его зарождения находится в весьма отдаленных от неё территориях.

Далее кратко остановимся на теории кумулятивного процесса. Физика кумулятивных превращений скрытой энергии в облачных системах подробно изложена в [9, 12], где фактически сделан вывод, что фронтальные облачные системы кумулятивно втягивают окружающий их воздух в конвективные облака и, тем самым, усиливают циклогенез. Во всем спектре конвективных облаков фронта в качестве основной характеристики применяется скорость вовлечения  $\lambda$ . Тогда общий поток массы в облаке выражается формулой:

$$M(z) = \int m(z, \lambda) d\lambda = \int m_B(\lambda) \eta(z, \lambda) d\lambda,$$

где  $\eta$  – функция, характеризующая кумулятивный эффект втекания, так как сам эффект втекания происходит за время значительно меньшее, чем успевают сформироваться существенные изменения в горизонтально ориентированном процессе;  $Z$  – высота над уровнем основания конвективного облака;  $m$  – масса воздуха;  $m_B$  – поток массы у оснований облаков, который определяется величиной  $\lambda$  (при отсутствии втекания  $\lambda = 0$ ). Втекание воздушных масс в облако происходит при достижении

некоего порогового значения градиента плотности, когда внутриоблачные воздушные массы поднялись вверх в силу конвекции, освободив пространство нижнего облачного слоя. Вовлечение в него окружающего воздуха резко происходит при достижении порогового градиента плотности между облаком и его окружением.

Чтобы рассмотреть подробнее кумулятивный эффект втекания, представим функцию  $\eta$  в виде:

$$\frac{d\eta}{dz} = \lambda\eta; \quad \frac{d\eta}{\eta} = \lambda dz; \quad \ln \eta = \int \lambda(z) dz + C; \quad \eta = Ce^{\int \lambda(z) dz}.$$

При различных  $\lambda$  величина  $\eta$  растет по-разному и на верхней границе облака величина  $\lambda$  опять обращается в нуль, т.е.  $\lambda$  отнюдь не константа, а полностью определяет величину  $\eta$  по всему интервалу высот от уровня втекания до верхней границы облака. На некотором уровне  $Z$  в пределах этого интервала величина  $\eta$  достигает максимума. Вовлечение происходит резко при “пороговом” разрежении воздуха в нижних слоях облака, то есть кумулятивными подъемами воздушных масс фронты поддерживают циклогенез. Градиент завихренности, обозначенный вектором Эллиасена–Пальма [11, 13], притягивает циклонический вихрь к более мощным вихрям облачных систем, поскольку угловая скорость, определяющая величину вихря в конвективном облаке гораздо больше, чем в самом циклоне. Таким образом, фронтальный раздел кумулятивно вытягивает в себя циклонический вихрь.

В северном полушарии взрывной циклогенез возможен в зимнее время по той же причине, как и в южном полушарии, когда холодный континентальный воздух встречается с влажным океаническим воздухом, перемещающимся над акваториями океанов. Кумулятивный антициклогенез происходит в несколько иной ситуации, когда сильно увлажненный воздух приобретает малую плотность над довольно большими территориями. Тогда, при достижении пороговых значений градиента плотности, сухой воздух антициклонов прорывается в виде гребневой структуры в область влажного воздуха. Если сухой антициклонический воздух достаточно нагрет, то конденсации паров влажного воздуха не происходит и взрывной циклогенез не осуществляется. Однако зона высокого давления и повышенной плотности быстро распространяется в область бывшей ранее циклонической депрессии, т.е. менее плотного влажного воздуха. Подобные ситуации наблюдались 06-

07.01. 2002 г. и 10.01. 2002 г., а также 15-16. 01. 2002 г. и 26-28.01. 2002 г. Тогда резкие кумулятивные вторжения гребневых структур в субполярные области, в том числе и через территорию Украины, вызвали одновременно вторжение холодного северного воздуха в южные широты и соответствующие аномалии температуры. При этом, прослеживая указанный процесс по картам погоды, вплоть до южного полушария, на спутниковых фотографиях облачности обнаруживаем зону кумулятивного циклогенеза в районе субантарктики на меридиане Мозамбикского пролива. Поэтому можно ожидать кумулятивный импульс телеконнекции, выполненный меридионально ориентированным прогрессивным волновым процессом, доходящим до субполярных широт северного полушария.

При антициклогенезе, если не создаются критические градиенты плотности, кумулятивное проникновение сухого воздуха во влажную воздушную массу практически не происходит. Такие градиенты при простом смешении воздушных масс обычно не возникают. Процесс смешения происходит плавно и, согласно [7], общее влагосодержание в облачном массиве описывается формулой:

$$\tilde{s}(z,t) = \frac{2}{H} \exp\left(\frac{w}{2k}z - \frac{w^2}{4k}t\right) f(w,k,s,s_1,s_2,H), \quad (1)$$

где  $w$  – вертикальная скорость в пределах слоя облаков;  $k$  – коэффициент турбулентности в облачном слое;  $H$  – высота тропопаузы;  $s_1$  и  $s_2$  – влагосодержание на уровне земной поверхности и тропопаузы.

Тогда для осуществления кумулятивного эффекта, согласно показателя при экспоненте в формуле (1), необходимо, чтобы величина вертикальной скорости  $w$  была бы большой, а это возможно в грядках конвективных облаков фронтальных разделов. Взрывной характер вовлечения воздуха в систему фронтальных облаков в этом случае и породит кумулятивный антициклогенез. Итак, пороговые величины градиента плотности возникают на линии фронтального раздела или передаются телеконнекцией от других кумулятивных процессов, например, от взрывного циклогенеза, произошедшего в Антарктических широтах. Такой импульс, по-видимому, может быть послан на большие расстояния посредством продольной прогрессивной волны в поле плотности воздуха.

## Меридиональные поперечные прогрессивные волны

Рассмотрим, согласно [4], модель чисто меридионального процесса для компонент скорости:  $V = -v_\varphi - iv_\theta$ ;  $U = v_\varphi - iv_\theta$  и геопотенциала  $\Phi$ , где  $v_\varphi, v_\theta$  – компоненты скорости в сферической системе координат  $(\varphi, \theta)$ ;  $\varphi$  – долгота;  $\theta$  – угол дополнения широты до  $90^\circ$ , отсчитываемый от полюса. Тогда система уравнений меридионального (осредненного по кругу широты) процесса на эквивалентно-баротропном уровне [4] будет:

$$\frac{\partial V}{\partial t} - 2\omega i \cos \theta V = \frac{i}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + 2\omega i \cos \theta U = \frac{i}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} + ctg \theta V + \frac{\partial U}{\partial \theta} + ctg \theta U - \frac{i\rho_0 g}{2aP_0} \frac{\partial H_s}{\partial \theta} (V + U) + \frac{\rho_0 B}{P_0} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Решение системы (2)-(4), согласно [4], ищем в виде рядов по обобщенным полиномам Лежандра:

$$V = \sum_{l=1}^L V_l P_{1l}(\cos \theta); \quad U = \sum_{l=1}^L U_l P_{-1l}(\cos \theta); \quad (5)$$

$$\Phi = \sum_{l=1}^L \Phi_l P_{0l}(\cos \theta).$$

В (5) левый индекс у полиномов Лежандра указывает номер компоненты вектора  $\vec{V} = (V, U, w)$ , по каждой из которых применяется свой набор обобщенных для векторных полей полиномов Лежандра. Коэффициенты  $V_l, U_l, \Phi_l$  задают весовые значения соответствующих полиномов Лежандра в Фурье – разложениях полей компонент вектора скорости по базисной системе обобщенных полиномов Лежандра. Подставляя ряды (5) с предварительно упорядоченными коэффициентами  $V_l, U_l, \Phi_l$  при одинаковых полиномах Лежандра в уравнения (2-4), получим систему спектральных уравнений относительно упомянутых коэффициентов:

$$\frac{dV_l}{dt} - 2\omega i \left[ V_{l-1} \frac{\sqrt{(l^2-1)l^2}}{(2l-1)l} + V_{l+1} \frac{\sqrt{(l+2)(l+1)^2 l}}{(l+1)(2l+3)} \right] = \frac{\sqrt{l(l+1)}}{a} \Phi_l, \quad (6)$$

$$\frac{dU_l}{dt} + 2\omega i \left[ U_{l-1} \frac{\sqrt{(l^2-1)l^2}}{(2l-1)l} + U_{l+1} \frac{\sqrt{(l+2)(l+1)^2 l}}{(l+1)(2l+3)} \right] = \frac{\sqrt{l(l+1)}}{a} \Phi_l, \quad (7)$$

$$\frac{\rho_0 B}{P_0} \frac{d\Phi_l}{dt} + \left( -\frac{i\rho_0 g}{2aP_0} \frac{\partial H_s}{\partial \theta} + \frac{\sqrt{l(l+1)}}{a} \right) (V_l + U_l) = 0. \quad (8)$$

Коэффициент  $\frac{\partial H_s}{\partial \theta}$  – переменная величина по координате  $\theta$  и в системе дифференциальных уравнений относительно спектральных мод  $V_l(t), U_l(t), \Phi_l(t)$ , являющихся функциями только времени, должен быть задан константой, что, естественно, отменяет точный учет орографических неоднородностей по выбранному меридиану.

Для получения решения уравнение (8) перепишем так:

$$\frac{d\Phi_l}{dt} + \left( -\frac{ig}{2aB} \frac{\partial \bar{H}_s}{\partial \theta} + \frac{P_0 \sqrt{l(l+1)}}{\rho_0 B a} \right) (V_l + U_l) = 0. \quad (9)$$

В такой постановке системы из уравнений (6),(7), (9) решение ищем в виде:

$$V_l = e^{i\sigma t} V'_l, \quad U_l = e^{i\sigma t} U'_l, \quad \Phi_l = e^{i\sigma t} \Phi. \quad (10)$$

При учете коэффициента  $-\frac{ig}{2aB} \frac{\partial \bar{H}_s}{\partial \theta}$  собственная частота колебаний  $\sigma$  получается комплексной величиной и волновой процесс становится неустойчивым.

Таким образом, орографические неоднородности зональной протяженности способны вызывать либо амплитудный рост меридионального волнового возмущения, либо его затухание.

Из физики атмосферных движений ясно, что прогрессивно смещающееся к северу из субтропических районов меридиональное волновое возмущение перед горным хребтом, например Кавказским, будет затухать. Однако такое же волновое возмущение, проходящее западнее Кавказа, может амплитудно расти, перерождаясь в блокирующее вторжение. Если же меридиональное волновое возмущение достаточно интенсивное, то оно может войти в соединение с азиатским гребнем и образовать "блок".

Далее вместо (9) рассмотрим решение без учета неустойчивости, т.е. с применением уравнения:

$$\frac{d\Phi_l}{dt} + \left( \frac{P_0 \sqrt{l(l+1)}}{\rho_0 Ba} \right) (V_l + U_l) = 0. \quad (11)$$

Тогда с помощью анализа уравнения (11) можно определить траекторию перемещения возмущения от субтропических широт, которое может идти, во-первых, через плоскогорье Сахары, Средиземное море и далее, через относительно невысокие хребты Таврии, выходит на Черное и Азовское моря и равнины восточной Украины и Северного Кавказа; или, во-вторых, пересекая экватор Индийского океана, затем, переваливая Иранское нагорье, оно достигает Прикаспийской низменности на территории Средней Азии и Усть-Юрта.

Определяя собственные решения в виде фазовых скоростей смещения прогрессивных меридиональных волн, получим для малых величин волновых векторов  $l$ , соответствующих крупным меридиональным волнам, устойчивые собственные моды.

Расчетная скорость смещения меридиональных волн достигает квазизвуковых значений, т.е. волна от высоких широт южного полушария, где возможны процессы кумулятивного циклогенеза, доходит до широт Украины за срок менее суток. Фазовая скорость смещения поперечной меридиональной волны будет:  $c = \frac{d\sigma}{dl}$ , где  $l$  – волновое число,  $\sigma^2 = 44,39 \cdot 10^{-8}$  – одна из собственных частот для устойчивых мод. Если  $l$  заменить его аналогом в виде длины волны  $\lambda = l^{-1}$ , то ее фазовая скорость приближается к  $20000 \cdot 10^3 / 6,5 \cdot 10^4 \approx 300$  м/с. Здесь меридиональная волна длиной 20000 км соответствует размерам гребневого вторжения через территорию Украины вплоть до субполярных широт.

Таким образом, меридиональные планетарные поперечные волны в эквивалентно-баротропном океане имеют сравнительно большую фазовую скорость смещения, которая при увеличении длины волны может превысить скорость звука, фактически переходя в класс продольных волн, перерождающихся снова в поперечные волны при их дальнейшей адаптации на поверхности эквивалентно-баротропного уровня.

### **Меридиональные продольные волны в поле плотности**

Продольные волны в поле плотности, идущие от кумулятивного циклона, имеют фазовую скорость смещения, сравнимую со скоростью звука:  $a = \sqrt{\kappa p \cdot \rho^{-1}}$ , где  $\kappa = c_p c_v^{-1}$ ,  $c_p, c_v$  – удельные теплоемкости воздуха при постоянном давлении и объеме соответственно. Если фазовую

скорость продольной волны определить в виде:  $\tilde{n}_\phi = \frac{\partial p}{\partial \rho}$ , то при

мгновенном изменении плотности во время кумулятивной конденсации паров изменение давления мало, т.к. при выделении тепла конденсации происходит (с учетом времени) адаптация полей давления и температуры. Этот процесс проходит уже в классе поперечных волн, имеющих указанную выше фазовую скорость меридионально ориентированного смещения. Естественно, что направление смещения продольной и поперечной волн в сторону северного полюса определяется горизонтальной ориентацией так называемого «фронта конденсации»:

$$\tilde{n}_\phi = - \left( \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} \right)^{-1},$$

где  $F$  – функция, отражающая конфигурацию фронта конденсации (соответствующего фронту ударной волны, расположенного к северу от центра кумулятивного циклона); координаты  $x$ ,  $y$  – направлены вдоль широты и меридиана соответственно.

Основной влагозапас в зону кумулятивного циклогенеза в южном полушарии поступает с муссонных территорий севера. При кумулятивном импульсе в поле плотности воздуха возникает класс продольных волн, имеющих движение с юга на север вследствие волнового сопротивления, вносимого волнами Кельвина, идущими от антарктического материка и переводящими импульс от кумулятивной конденсации в северное направление. Пороговые значения градиента плотности, возникающие в кумулятивном процессе, распространяются продольной волной на всю зону действия меридиональной волны через фронт  $F$  вплоть до высоких широт северного полушария, позволяя тем самым осуществить процесс кумулятивного вторжения гребневой структуры в зону переувлажненного воздуха.

Принимая подобные рассуждения, можно сделать предварительный вывод, что телеконнекция на продольных волнах в поле плотности существенно отличается от телеконнекции южного процесса, проходящего через ячейки Гадлея и Ферреля от импульса, вносимого течением Эль-Ниньо.

Далее с целью учета реакции атмосферы на кумулятивное вторжение следует рассмотреть обратные по направлению волны Кельвина на вращающейся сфере земного шара, т.е. демпфирующее свойство атмосферы.



Основные уравнения для волн Кельвина возьмем в цилиндрической системе координат, имеющих центр распространения в районе северного полюса:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} - 2\omega v + g \frac{\partial \zeta}{\partial r} &= 0; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + 2\omega u + \frac{g}{r} \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} &= 0; \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0,\end{aligned}\tag{12}$$

где  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – составляющие скорости ветра;  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\zeta$  – превышение высоты свободной поверхности эквивалентно-баротропного слоя;  $w = \frac{\partial \zeta}{\partial t}$ . Полное

решение системы (12) предложено [1, 2] в виде:

$$\begin{aligned}\zeta(r, \theta, t) &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M J_m(\lambda_{m,n} r) \times \\ &\times (A_{m,n} \cos(m\theta) \cos(\sigma_{m,n} t) + B_{m,n} \sin(m\theta) \sin(\sigma_{m,n} t)),\end{aligned}$$

где  $\sigma_{m,n}$  – собственные частоты демпфирующих волн Кельвина;  $\lambda_{m,n}$  – значения корней функций Бесселя  $J_m$ ;  $r$  – радиус области решения, направленный от полюсов в северном и южном полушариях;  $A_{m,n}$ ;  $B_{m,n}$  – энергетические моды в синоптическом процессе, образовавшиеся после стадии кумулятивного антициклогенеза в северном полушарии и кумулятивного циклогенеза в южном.

Таким образом, демпфирующий волновой процесс, идущий от полюсов на волнах Кельвина, способствует направлению кумулятивного вторжения через субтропический пояс высокого давления вплоть до субполярных широт северного полушария.

### Выводы

Меридиональное вторжение поперечной волны, ускоренное продольной волной кумулятивного процесса, несет на себе фронт ударной волны на границе кумулятивного вторжения гребневой структуры вплоть до субполярных широт северного полушария.

Фронт конденсации можно, по-видимому, приравнять к кумулятивному фронтогенезу.

Телеконнекция на продольных волнах в поле плотности существенно различается с телеконнекцией Южного процесса, проходящей через ячейки Гадлея и Ферреля, от импульса, вносимого течением Эль-Ниньо.

Демфирующий волновой процесс, осуществляющийся из районов обоих полюсов волнами Кельвина, является организатором кумулятивных вторжений в различных направлениях земного шара.

\* \*

*Розглянуто питання передачі імпульсів від просторово віддалених джерел в атмосферні процеси, що відбуваються над територією України. Проведено аналіз кумулятивних процесів і запропоновано гіпотезу нового механізму телеконекції.*

\* \*

1. Волошина Е.В., Ефимов В.А., Шинкевич Н.Г. Информационное расширение данных аэрологического зондирования // Метеорология, климатология и гидрология. – Вып. 38. – 1999. – С. 203-208.
2. Грей Э., Мэтьюз Г.В. Функции Бесселя и их приложения к физике и механике. – М.: ИЛ, 1953. – 372 с.
3. Ефимов В.А. Математическая теория экспериментов по долгосрочному прогнозу динамики атмосферы южного полушария // Тр. ААНИИ. – 1982. – Т. 365. – С. 12-96.
4. Ефимов В.А. Математическое моделирование долговременных нестационарных планетарных процессов в системе океан-атмосфера // Тр. Аркт. и Антаркт. научн.-исслед. ин-та. – 1976. – Т. 336. – 275 с.
5. Казначеева В.Д. Телеконнекции между характеристиками низкочастотной циркуляции и приземной температурой воздуха // Тез. докл. Всемирной конф. по изменению климата. – М. – 2003. – С. 466.
6. Мартазинова В.Ф., Сологуб Т.А. Атмосферная циркуляция, формирующая засушливые условия на территории Украины в конце XX ст. // Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2000. – Вип. 248. – С. 36-47.
7. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1984.–752 с.
8. Нечволодов Л.В., Лобов А.Л. и др. О связи аномалий меридионального переноса тепла в Северной Атлантике с явлением Эль-Ниньо – южное колебание // Метеорология и гидрология. – 1999. – Вып. 6. – С. 53-65.
9. Теоретические основы прогноза погоды на средние сроки // Сб. переводных статей. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 138 с.

10. *Филандер С.Дж., Расмуссон Е.М.* Южная осцилляция и Эль-Ниньо // *Динамика климата.* – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – С. 205-223.
11. *Andrews D.G., McIntyre M.E.* Planetary waves in horizontal and vertical shear the generalized Eliassen-Palm relation and mean flow acceleration // *J. Atmos. Sci.* – 1976. – Vol. 33. – P. 2031-2048.
12. *Arakava A., Schubert W.H.* Interaction of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment // *P.I.-J. Atm. Sci.* – 1974. – Vol. 31, N 3. – P. 674-701.
13. *Edmon H.J., Hoskins B.J., McIntyre M.e.* Eliassen-Palm cross-section for the troposphere // *J. Atmos. Sci.* – 1980. – Vol. 37. – P. 2600-2616.

*Одесский государственный экологический университет*