

УДК 551.5

В.А.Ефимов, Г.П.Ивус

О ФИЗИКЕ АНТИЦИКЛОГЕНЕЗА СОВРЕМЕННОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭПОХИ

Изложены теоретические основы причин смены климатических эпох. Приведены принципы моделирования циркуляционного фона климатической эпохи. Представлена теория блокирующих процессов. Реализована модель солитона Россби.

Геофизические факторы, определяющие основу климатических преобразований, суммируются в понятиях климатических эпох и их стадий. Введем понятие климатической эпохи, но, в отличие от [6], представим климатическую эпоху в категориях геофизических понятий, а не только в макросиноптическом обзоре атмосферных процессов, характеризуя их формами циркуляции атмосферы. Сами по себе эти формы [6-8], конечно, включают основной комплекс геофизических понятий, но в скрытом виде. Поэтому определение климатической эпохи только по преобладающей в ней форме циркуляции атмосферы является не расшифрованным. Отдельные геофизические процессы, такие как колебания индекса солнечной активности, не могут служить достаточным обоснованием для диагноза и прогноза смены климатических эпох, также как нельзя ограничиться только учетом возрастающей роли антропогенного фактора в виде техногенных тепловых вторжений и растущего парникового эффекта [11]. Состояние климатической эпохи во многом определяется активностью процессов антициклогенеза, которые создают существенные изменения в системе зонального переноса и формируют комплекс погодных условий над большими территориями.

В качестве модели, определяющей циркуляционную эпоху, предлагается использовать генезис антициклонических структур. Теория образования гребневых структур в барическом поле опирается на волновую концепцию Гаурвица-Россби [14], согласно которой волна Россби может стационаризовать, если меридиональная составляющая ее амплитуды достигает достаточно большой величины. Волны Гаурвица-Россби параметризуются решением уравнения вихря:

$\frac{\partial \Delta \psi}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta \psi}{\partial x} + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$, где ψ - функция тока; U - скорость зонального переноса; β - параметр Кориолиса. Тогда $\psi = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \cos \frac{2\pi}{b} y$, где λ - длина волны; c - фазовая скорость; t - время; b - параметр, характеризующий меридиональную протяженность волны. При $v = \infty$ формула Россби для фазовой скорости смещения инерционной волны будет: $c = U - \frac{\beta}{4\pi^2} \lambda^2$. Если $c = 0$, то длина стационарной волны (λ_s) связана со скоростью зонального переноса: $\lambda_s = 2\pi \sqrt{U \cdot \beta^{-1}}$. Решение Гаурвица более подробно учитывает величину v , и тогда $\lambda_s = 2\pi \sqrt{\frac{U}{\beta} (1 - \frac{4\pi^2 U}{\beta b^2})^{-1}}$. Однако при этом необходимо, чтобы удовлетворялось неравенство $1 - \frac{4\pi^2 U}{\beta b^2} > 0$ или $b > 2\pi \sqrt{U \beta^{-1}}$. Используя [3, 4], можно определить параметризацию стационарной волны по формуле Гаурвица-Блиновой:

$$\Phi' = C_n^m P_n^m(\cos \theta) \exp \left\{ im\varphi - imt \left[\alpha - 2 \frac{\alpha + \omega}{n(n+1)} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $P_n^m(\cos \theta)$ - присоединенный полином Лежандра, определяющий меридиональный профиль волны; θ, φ - дополнение широты до 90^0 и азимутальный угол; α - угловая скорость зонального переноса; ω - угловая скорость вращения Земли; n, m - зональная и меридиональная проекции волнового вектора; условие стационарности определено как: $\alpha = 2 \frac{\alpha + \omega}{n(n+1)}$ или $n(n+1) = 2 \frac{\alpha + \omega}{\alpha}$ - получаем возможность сравнить с параметризацией волны солитонном Россби.

Она, согласно работам [2, 15, 16], представляется в форме:

$$\psi_n = \sum_{\mu=0,1} \exp \left(\sum_{j=1}^N \mu_j \left(\eta_j + i \frac{\pi}{2} \right) + \sum_{1 \leq i < j} \mu_i \mu_j A_{ij} \right), \quad (2)$$

где $\eta_i = k_i x - \omega_i t + \eta_i^{(0)}$ - волновой вектор в координатах (z, t) ; $\omega_i = \frac{1}{k_i}$;

$$e^{A_{ij}} = -\frac{(k_1 - k_2)^2}{(k_1 + k_2)^2}, \quad \mu_i, \mu_j - \text{ аппроксимационные коэффициенты; } k_i, k_j -$$

волновые числа.

Сравнительный спектральный анализ формул (1) и (2) позволяет выявить географическую локализацию энергетических вкладов, необходимых для перестройки стационарной волны Гаурвица-Блиновой в волновой процесс по типу солитона Россби. Выявлено, что для осуществления перехода стационарировавшей волны Россби в стадию солитона необходима добавочная энергетическая подпитка от процессов, не относящихся к классу инерционных волн в атмосфере [14]. Если процессы, вводящие добавочную энергию в волновую структуру, идут под воздействием местных факторов, то энергетическая структура блокирующего солитона Россби обычно реализуется без проявления резких погодных аномалий. Иная возможность энергетической поддержки процесса образования блокирующего солитона происходит за счет телеконнекции, когда передача энергии осуществляется меридионально направленной волной макромасштабных барических образований, действующих на достаточно удаленном расстоянии друг от друга. Такого рода энергообмены получили название Южный процесс и изучены на примере Эль-Ниньо [13]. Еще один вид телеконнекции реализуется посредством продольных волн в поле плотности, перемещающихся в меридиональном направлении с квазизвуковой скоростью [9-10]. Эти волны привносят в энергозапас, стационарировавшей в фазе гребневой структуры волны Гаурвица-Россби-Блиновой, кумулятивный энерговклад, достаточный для того, чтобы перевести прогрессивную инерционную волну в стационарное состояние или стадию уединенной волны. Этот процесс обычно сопровождается погодными аномалиями, т.к. резкий приход внешней энергии определяет пульсации энергодобавки текущего циркуляционного процесса.

Взрывное проникновение гребневых структур в фон текущего синоптического процесса возможно также на основе длительного накопления паросодержания на больших территориях. Такое явление присуще типовой форме западной циркуляции современной климатической эпохи. При достижении порогового градиента в поле плотности происходит резкий прорыв компенсирующей массы воздуха в район с избыточным увлажнением, выравнивая градиенты в поле

плотности. Прорыв гребневых структур при этом осуществляется настолько быстро, что может привести к стационарированию волны Гаурвица – Россби (см. параметр b в формуле Гаурвица) и далее к существенной перестройке энергетического баланса, вызывающей погодные аномалии.

Объяснение причин смены климатических эпох и их стадий (под стадией климатической эпохи понимается временной интервал, на котором происходит сезонное существование типовой формы циркуляции, характеризующей эпоху) следует тесно связывать с географическими особенностями территорий, которые оказывают влияние на факторы, формирующие антициклогенез. К таким особенностям, в первую очередь, следует отнести состояние поверхности мирового океана, степень увлажнения подстилающей поверхности и прилегающей к ней толщи атмосферы, а также колебания в системе океан-атмосфера, происходящие по типу Южного процесса.

Согласно изложенному методу анализа физических механизмов, приводящих к возникновению блокирующих гребневых структур на фоне зональной циркуляции, можно определить причины смен циркуляционных эпох (с широтной на меридиональную), а также выяснить причины современного перехода к эпохе юго-западной циркуляции и понять механизмы современных климатических перестроек [4, 11].

Основным фактором, влияющим на изменения атмосферной циркуляции, и соответственно на влагооборот, следует считать климатические изменения в процессах цикло- и фронтогенеза. Эти изменения могут быть вызваны, согласно [6], сменой стадии климатической эпохи. Начало современной циркуляционной эпохи можно отнести к концу XX столетия, тогда стали проявляться процессы активного фронтогенеза в южных и центральных районах Европы, распространяющиеся вплоть до Восточной Сибири. Эти процессы привели к катастрофическим наводнениям в Великобритании, Франции, Германии, Украине (особенно в районе Карпат и бассейне Дуная) и России (предгорье Северного Кавказа). Все это указывает на определенную смену ориентации осей влагооборота между Атлантическим океаном и Западной Европой. Оси вторжений циклонов, направленные от Исландского минимума, в данном случае находятся значительно южнее, чем обычно, то есть траектории скандинавских

циклонов, пролегающие севернее Англии, сменились на направления, проходящие через южные районы Атлантики, минуя Ла-Манш и Бискайский залив. Перемещаясь через более теплые районы, воздушные массы приобретают значительно больший влагозапас, который, попадая в область усиленного антропогенного загрязнения, характерную для средних широт Западной Европы, получает существенно больший приток ядер конденсации, что способствует существенному осадкообразованию над Великобританией и странами западного побережья Европейского континента. Остаточный влагозапас этих же циклонов, пополняясь испарением с территории южных районов Западной Европы и прилегающих морских акваторий, снова реализуется в процессе осадкообразования уже в предгорьях Карпат, Родоп и Балкан.

Расчеты по модели Х.Адема, модифицированной с учетом атмосферного влагооборота [1], выявили, что выделяются два фронтальных раздела: арктический и полярный. Полярный фронт расположен на северной акватории Средиземного моря, захватывая территорию Турции. Арктический фронт проходит от Исландского минимума по северным районам Скандинавии и России. Вихреисточник орографического типа наблюдается в районе Альп. В полярных широтах вырисовывается мелкочаеистая структура барического поля, обусловленная зональными траекториями небольших циклонов. Циклонические циркуляции в зоне умеренных широт и полярной области разделены поясом высокого давления, который смыкается с Азорским максимумом, выраженным в гребневой структуре, прослеживающееся над всей акватории Атлантического океана. Пояс высокого давления обусловлен инсоляцией за счет действия увеличенного альbedo снежного покрова, тогда как в более южных районах возрастает доля длинноволнового излучения. Длинноволновое выхолаживание от снеговой зоны в Северной Европе, существующее в зимне-весенний период, вызвало пояс высокого давления, отделивший арктический фронт от полярного.

Результаты расчета по модели Х.Адема показали, что первая климатическая эпоха зональной циркуляции отличается существенной разнесенностью по широте арктического и полярного фронтов и ярко выраженным западным переносом, особенно в низких широтах. Смена климатической эпохи, в основном, определяется возникновением

гребневых структур в главенствующем зональном переносе, который преобладал в первой из выделенных циркуляционных эпох.

Дальнейшая смена циркуляционных эпох отличается преимущественным развитием гребневых структур, нарушающих зональный перенос. Эти гребневые вторжения, идентифицируемые в [6, 8] как E и C формы циркуляции, могут быть кратковременного существования, далее они сменяются зональной W формой циркуляции. Возникновение движущихся вдоль широтного круга гребневых структур является следствием фронтогенеза, проявляющегося под воздействием термической или орографической неоднородностей подстилающей поверхности. Инерционная волна Гаурвица-Россби, обусловленная процессами фронтального раздела, смещается с фазовой скоростью, определенной частотой: $\sigma \equiv \sigma_n^m = -\alpha m + \frac{2(\alpha + \omega)m}{n(n+1)}$, что в итоге приводит к первичному появлению гребневых структур в Атлантико-Европейском секторе.

Стационарная волна Россби может поддержать свое существование, превращаясь в уединенную волну так называемого солитона Россби. Причем этот процесс возможен, в основном, в стадии ее гребневой фазы. В фазе циклона длительное стационарирование волны Россби нарушается вторжением процессов фронтогенеза при окклюдировании циклона. Сам фронтальный раздел тоже имеет вид уединенной волны, энергетика которой поддерживается скрытой энергией фазовых переходов влагосодержания фронтальной облачности.

Задавая аналитические решения модифицированной модели Х. Адема в поле комплексного потенциала скоростей (w) в виде:

$$w = \bar{v}_\infty z + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n q_k \ln(z - a_k) - \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^p \frac{M_k e^{\alpha_k i}}{z - c_k} - \frac{i}{2\pi} \sum_{k=1}^m \Gamma_k \ln(z - b_k), \quad (3)$$

оно может быть параметризовано с помощью простых источников (n), определенных в точках a_k ($k = 1, 2, \dots, n$), с обильностями: q_k ($k = 1, 2, \dots, n$), а также вихрями (m) в координатах b_k ($k = 1, 2, \dots, m$) с циркуляциями: Γ_k ($k = 1, 2, \dots, m$) и дублетами в координатах c_k ($k = 1, 2, \dots, p$), с моментами M_k ($k = 1, 2, \dots, p$) и углами ориентации осей дублетов α_k ($k = 1, 2, \dots, p$).

Если аппроксимационная формула (3) может описать солитон, то она должна в качестве решения также удовлетворять одному из уравнений волны типа солитон, например, уравнению Картвега де Фриза:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} - 6\psi \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial z^3} = 0 \quad (4)$$

или уравнению синус-Гордона:

$$\frac{\partial^3 \psi}{\partial z^3} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \text{Sin}\psi, \quad (5)$$

где $z = x + iy$.

Решение уравнения синус-Гордона, согласно [2], имеет схожий вид с решением (2).

Решения (2) и (5) представляют собой аналитические функции почти одинаковой структуры и описывают функцию тока, являющуюся частью комплексного потенциала скорости, которая, в свою очередь, может быть задана выражением:

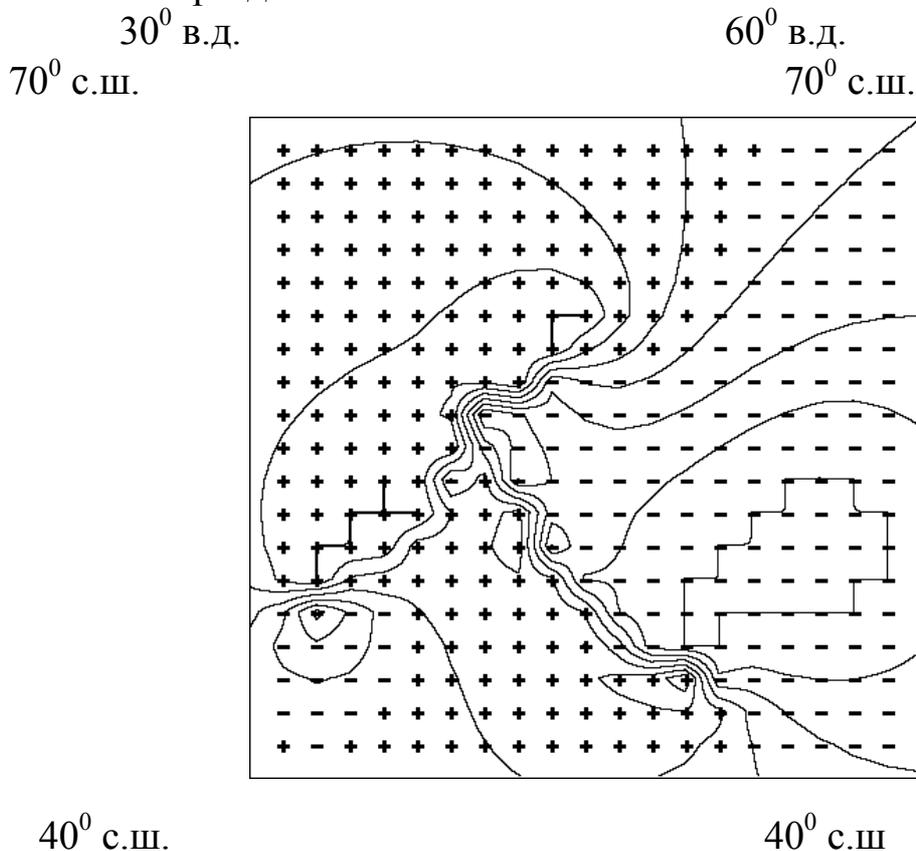
$$V = \left(\frac{dw}{dz} \right) = \bar{v}_\infty + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{z - a_k} + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^p \frac{M_k e^{\alpha_k i}}{(z - c_k)^2} - \frac{i}{2\pi} \sum_{k=1}^m \Gamma_k \frac{1}{z - b_k} \quad (6)$$

В первом приближении численные параметры формулы (6) задаются по результатам аппроксимации численных решений моделей Адема или Блиновой, [2,4] после того, как они параметризованы функцией (6). Многосолитонное решение уравнений типа (4) или (5) способно описать гребневую структуру и фронтальный раздел, т.к. оба эти образования в атмосфере имеют характер уединенной волны, не вступающей во взаимодействие с другими волнами Россби-Блиновой.

На рис.1 приведена ситуация в виде циклонической депрессии, блокированной гребневой структурой. Эта ситуация получена моделированием типового процесса с помощью модели Х. Адема с последующей параметризацией аппроксимационной формулой (6). Циклон и гребень вместе представляют собой стационарную волну

Россби. В циклоне располагаются фронтальные разделы. Вдоль фронтальных разделов проходят струйные течения, выраженные сгущением изолиний функции тока, направления которых для холодного и теплого фронтов центростремительное относительно центра циклона. Скорость течений определяется по градиенту к линиям тока. Направление движения в области фронта отличается от классического центробежного и объясняется тем, что циклон, находящийся в начальной стадии окклюдирования, блокирован с востока гребнем и регенерирует за счет привлечения периферийного запаса бароклинной неустойчивости.

Задание типа фронтального раздела диполями в поле комплексного потенциала скорости должно быть согласовано с направлением тяги фронтальной струи, которое зависит от текущего процесса и стадии фронтогенеза. В молодых циклонах тяга фронтальных струй, в основном, центробежная, тогда как в окклюдированных циклонах тяга приближается к центростремительной. Центростремительная тяга фронтальных струй способствует регенерации циклогенеза, т.к. привлекает периферийные источники бароклинной неустойчивости и, в определенных условиях, увеличивает влагосодержание воздушных масс на фронтальных разделах.



30⁰ в.д.60⁰ в.д.

Рис.1. Функция тока на поверхности 925 гПа в циклоне и блокирующей его гребневой структуре. Положительные значения функции (+) находятся слева от направления движения

Известно, что тяга теплого фронта обычно должна быть центробежной [9]. Однако, при блокировании траектории циклона солитонной структурой направление тяги теплого фронта способно сменится на обратное. Тогда энергоемкость циклона и его фронтов поддерживается за счет энергоемкости солитонной структуры блокирующего гребня. На рис. 2 представлены отклонения функции тока от точного решения уравнения (4) для процесса, приведенного на рис.1. Из рис.2 видно, что солитонный тип волны совмещается с волновым процессом по всей занимаемой гребнем территории, тогда как в области фронтальных разделов для установления солитонного характера блокирования требуется осуществление процесса смены направления тяги теплого фронта на обратное. В области холодного фронта отклонения от солитонного типа фронтальной волны достаточно велики. Поэтому можно сделать вывод: в данном случае фронтальные разделы еще не приобрели характер движения по типу солитона, независимого от соседних волн Россби, и находятся в фазе активного энергообмена с окружающим пространством. Крупный положительный очаг отклонения от солитонной структуры на южной периферии теплого фронта (рис.2) требует смены направления тяги фронтальной струи на центростремительное, что подтверждается данными рис.1. Причем, на всем протяжении теплого фронта небольшое отрицательное отклонение совпадает с отклонением в области гребневой структуры, а сам теплый фронт входит в солитонную структуру блокирующего гребня.

30⁰ в.д.
70⁰ с.ш.

60⁰ в.д.
70⁰ с.ш.

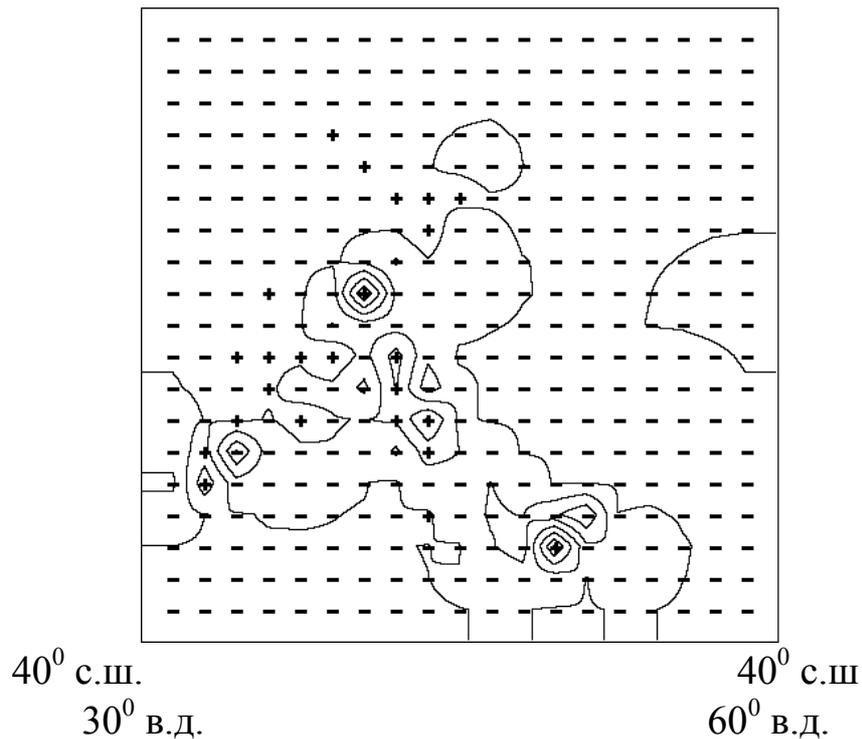


Рис.2. Функция тока для процессов, препятствующих установлению солитонных структур в области гребня и фронтальных разделов (ориентация и координатная сетка совпадают с рис.1)

В области холодного фронта многоочаговая структура отклонений от солитонной структуры указывает на необходимость стабилизации направлений тяги фронтальных струй, т.е. на установление баланса направлений тяг фронтальных струй, чтобы солитон Россби не имел притока массы от окружения, а только – приток тепла и влаги. Тот же эффект прослеживается и на всем протяжении фронта окклюзии. Заметим, что для осуществления регенерации циклонов главная роль фронтов состоит именно в привлечении энергозапаса из окружающего пространства. Если фронт поставляет только влагозапас и не отдает его внешнему окружению, то последующая активизация в нем скрытой энергии как раз и будет той внутренней энергоподпиткой фронтальной волны солитонного типа, которая входит в энергетическую независимую структуру фронтального солитона. Совместно с энергетической солитонной структурой блокирующего гребня она составит энергоцикл блокирования.

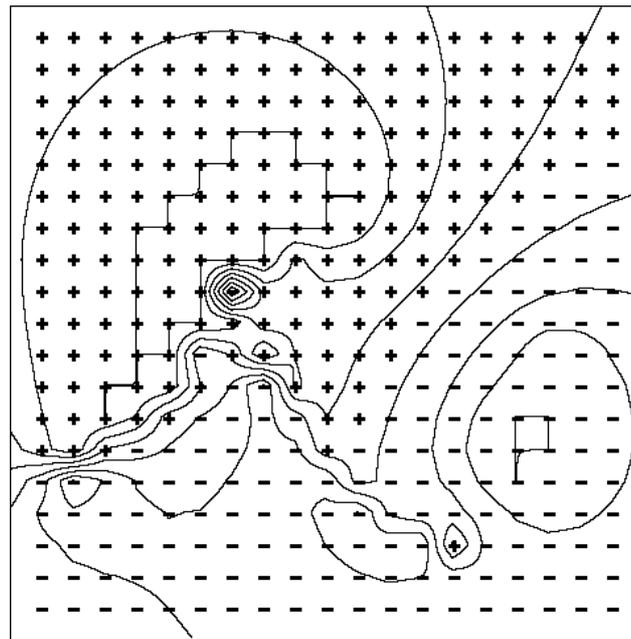
Следовательно, чтобы отличить прогрессивную волну Россби-Гаурвица-Блиновой от солитона Россби необходим совместный анализ

фронтальной зоны и гребневой структуры. Фронтальный раздел, стремясь пройти через южную часть гребня, должен энергетически замкнуться при подходе к основанию гребня. Теплый фронт будет иметь центробежное направление участка фронтальной струи, в то время как отрезок холодного фронта с противоположной стороны подошвы гребня – обратное центростремительное ускорение. В этом случае упомянутые участки струй объединятся в единую планетарную фронтальную систему. Если же гребневая структура вытянута в широтном направлении, то ее солитонный вид должен иметь форму замкнутых изолиний антициклона, по южной периферии которого проходит планетарный фронтальный раздел.

С целью упорядочения направления тяги фронтальных струй приводится переориентация осей диполей, моделирующих облачность теплого фронта (рис. 3). В данном случае от центра циклона в зоне теплого фронта направление тяги будет центробежное, согласно классической схеме. Такое же направление тяги обнаруживается и на периферии теплого фронта в зоне его соприкосновения с гребневой структурой. Направление тяги в области всего холодного фронта будет центростремительное, а в зоне фронта окклюзии, в основном, центробежное. На рис. 4 представлен результат расчета области положения волны солитонного типа, показывающий, что практически вся ситуация удовлетворяет многосолитонному решению (4) уравнения Картвега де Фриза.

30⁰ в.д.
70⁰ с.ш.

60⁰ в.д.
70⁰ с.ш.



40° с.ш.
30° в.д.

40° с.ш.
60° в.д.

Рис.3. Поле функции тока для ситуации, приведенной на рис.1, с коррекцией облачных структур теплого фронта (ориентация и координатная сетка совпадают с рис.1)

Небольшие отклонения в области фронтов, по-видимому, показывают некоторую недостаточность для образования волны типа солитон в области расположения фронтов из-за нарушения баланса тяги фронтов. Практически баланс здесь почти достигнут при суммировании тяги всех трех фронтов: теплого, холодного и окклюзии. Фактическое удовлетворение решению солитона всей ситуации, особенно на верхнем обрезе рисунка, объясняется тем, что барическая ситуация в этом районе не определена и является как бы продолжением гребневой структуры. Тот факт, что фактически и циклоническая ситуация тоже удовлетворяет волновому решению солитонного типа, подтверждается переходом всей структуры бывшей стационарной волны Россби, при заданном распределении фронтальной облачности, в солитон Россби. Однако, в этом случае фронтальные разделы также должны представлять собой волновой процесс, в то время как фронт, в основном, состоит из цепочки вихревых структур или, как их принято называть, термодинамических соленоидов. Если на цепочке соленоидов, как на несущей поверхности,

формируется волновой процесс в виде зон сжатия и разряжения, то вдоль фронтального раздела появится продольная волна. Если же на вершинах конвективных термиков возникает волновой процесс поперечного типа, то такая волна соизмерима с волной Россби и может войти вместе с ней в систему солитона Россби. На рис. 4 функция тока процессов, препятствующих образованию солитона, расположена как раз в районе фронтальных разделов и по ее виду можно предположить наличие волнового процесса, недостающего для вхождения фронтальных разделов в солитон Россби.

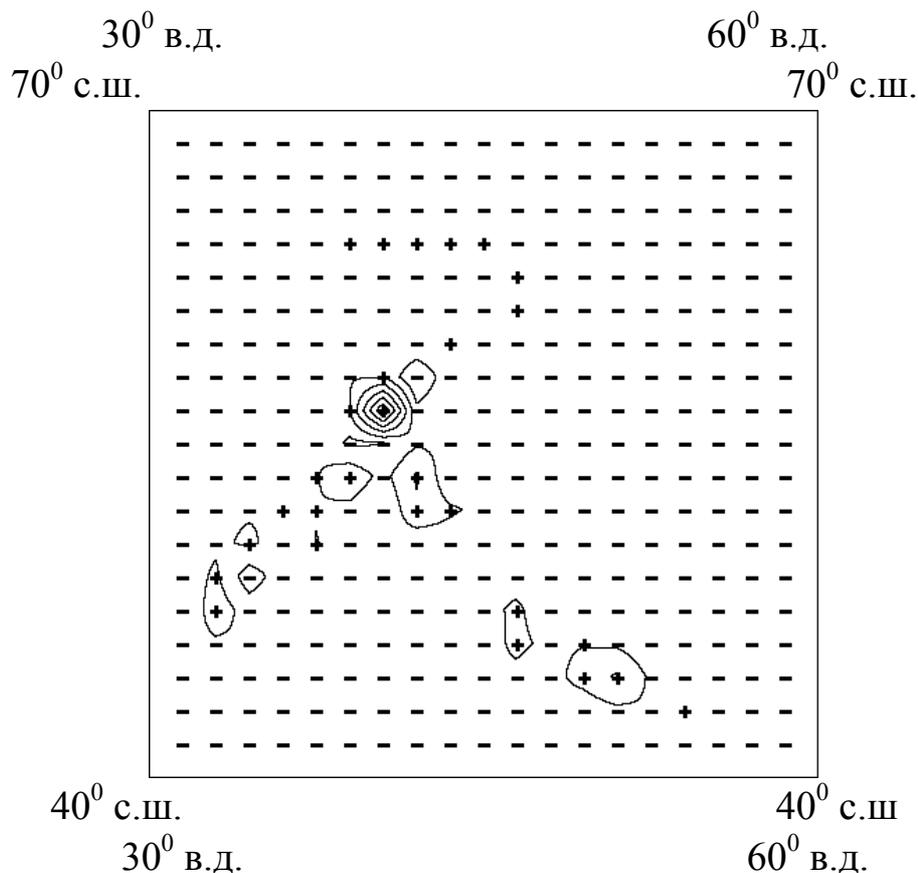


Рис.4. Функция тока процессов, препятствующих установлению солитонных структур в области гребня и фронтальных разделов (ориентация и координатная сетка совпадают с рис.1)

Следует отметить, что с целью устранения массообмена солитона с окружающим пространством упомянутый волновой процесс должен обеспечить баланс перемещения воздушных масс вдоль фронтального раздела. Энергоподпитка солитона за счет влагопереноса и последующей реализации скрытой энергии все же требует участия фронтов во

влажнопоступлении. Поэтому фронтальные разделы являются внешним источником энергии в солитоне, а волновой процесс в них имеет эпизодический характер и только в периоды своей активности входит в систему солитона.

Таким образом, можно сделать вывод: смена климатических эпох происходит при возникновении условий для проявления блокирующих процессов. Первичной основой блокирования является меридиональное проникновение воздушных масс в область, долгое время насыщаемую водяным паром. Далее создаются условия для поддержания устойчивой циркуляции солитона Россби в виде замкнутого цикла энергообмена, осуществляемого на ограниченной территории. Этот цикл, в свою очередь, обуславливает существование устойчивого во времени и пространстве независимого массообмена, препятствующего широтному перемещению воздушных масс. Этим территориально определяется географический фактор организации климатической эпохи.

* *

Викладено теоретичні основи причин зміни кліматичних епох. Наведено принципи моделювання циркуляційного фону кліматичної епохи. Представлена теорія блокуючих процесів. Реалізована модель солітона Россбі.

* *

1. Адем Х. О физических основах численного прогноза среднемесячных и среднесезонных температур в системе тропосфера-океан-материк. В кн. Теория климата. Сб. перев. статей. Под редакцией Л.С.Гандина, А.С.Дубова, М.Е.Швеца. Л.: Гидрометеиздат.- 1967.- С.258-292.

2. Абловиц М., Сигур Х. Солитоны и метод обратной задачи..- М.: Мир.- 1987.- 480 с.

3. Блинова Е.Н. Гидродинамическая теория волн давления, температурных волн и центров действия атмосферы // Докл. АН СССР.- 1943.- Т.39.-№7.- С.284-287.

4. Блинова Е.Н. К теории годового хода незональной циркуляции атмосферы // Тр. ИФА.-1958.-№2.-С.5-22.

5. *Гирс А.А.* Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы.- Л.: Гидрометеоиздат.- 1971.- 280 с.
6. *Гирс А.А.* Основы долгосрочных прогнозов погоды.- Л.: Гидрометеоиздат.- 1960.- С. 559.
7. *Вангенгейм Г.Я.* Опыт применения синоптических методов к изучению и характеристике климата.- Л.: Гидрометеоиздат.- 204 с.
8. *Ефимов В.А.* Гидродинамический метод прогноза на декаду и месяц. Развитие самообучающихся систем прогноза. – Тр. Гидрометцентра СССР.- 1987.- Вып. 285. 163 с.
9. *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.
10. *Израэль Ю.А.* Науки и Земле на рубеже веков: науки об атмосфере и гидросфере // Метеорология и гидрология.-1999.-№ 5.- С.18-31.
11. *Мартазинова В.Ф. Сврдлик Т.А.* Крупномасштабная атмосферная циркуляция XX столетия, ее изменения и современное состояние.- Тр. УкрНИГМИ.-1998.- С.18-31.
12. *С.Дж.Филандер, Е.М.Расмуссон.* Южная осцилляция и Эль-Ниньо. В кн.: Динамика климата.- Л.:Гидрометеоиздат.- 1988.- С. 205-223.
13. *Халтинер Дж., Мартин Ф.* Динамическая и физическая метеорология. М.: ИЛ.- 1960.- С.435.
14. *Benney D.J.* Long non-linear waves in fluid flows. J. Math. And Phys., 1966, vol.45, p.5263.
15. *Long R.R.* Solitary waves in the westerlies. - J.Atm.Sci., 1964, vol.21, p. 197-200.