

УДК 551.58: 551.571.7

Ивус Г.П., к. геогр. н., доц., **Ефимов В.А.** д. ф.-м. н., проф.,

Грушевский О.Н., к. геогр. н.

Одесский государственный экологический университет

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ БЛОКИРОВАНИЯ ЗОНАЛЬНЫХ ПЕРЕНОСОВ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ УКРАИНЫ

Обосновывается теоретическая схема механизма образования солитона Россби из начальной стадии развития волнового процесса в виде волны Кельвина, ее трансформации в прогрессивную волну Россби и последующего перехода в стадию стационарной волны Россби. Преобразование стационарной волны Россби в солитон Россби рассматривается с помощью анализа основных физических причин происходящей энергетической перестройки волнового процесса.

Ключевые слова: волна Кельвина, волна Россби, блокирование, солитон Россби.

Введение. Известно, что процессы устойчивого блокирования обуславливаются возникновением в зональном потоке меридиональных, диспергирующих волн способных не только длительное время поддерживать свою форму и скорость, но и сохранять их после столкновения с другими волнами.

Одним из типов подобных волн являются волны Кельвина, для которых характерно меридиональное распространение (с севера на юг и наоборот). Примером такого рода может послужить распространение Азорского максимума вдоль западного побережья Европы в сторону Норвежского моря.

При развитии такого процесса верхняя часть волны Кельвина способна выйти из соприкосновения с основной частью и, оторвавшись, вступить в состав волнового комплекса инерционных волн Россби, приобретая прогрессивное смещение к востоку вплоть до территории Украины. При этом волна Россби может стационарироваться у восточной границы Украины, если ее амплитуда будет достаточно значительной (например, волна своей вершиной достигает субполярных широт). Стационарная волна Россби, находясь в гребневой фазе, является начальной стадией блокирования зональных траекторий циклонов, которые перемещаются с умеренных широт Атлантики вплоть до Западной Сибири [1].

В дальнейшем, в силу ряда взаимосвязанных причин, стационарная волна Россби может перейти в стадию солитона Россби. Этому должен способствовать самостоятельный энергетический баланс, складывающийся в зоне деятельности волны Россби. В первую очередь, устанавливается вихревой баланс антициклона и блокированных им циклонов; однако преобладающую долю энергетического баланса содержат в себе фронтальные разделы блокированных циклонов. В основном это скрытая энергия конденсации паросодержания в облачных системах фронтов, которая на порядок больше кинетической и доступной потенциальной энергии вихревых образований в структуре солитона Россби. Дополнительным источником энергии служат оптически толстые слои атмосферы, расположенные в пределах подинверсионных слоев. Энергия поглощаемых этим слоем потоков радиации выступает в качестве одной из составных частей энергетического баланса.

В качестве **материала исследования** взят синоптический архив за 1990 – 2005 гг. В этот период неоднократно проявляли себя процессы, связанные с блокированием траекторий циклонов над территорией Украины. Как известно [1], увеличение количества опасных и стихийных гидрометеорологических явлений в последнее

десятилетие XX и начале XXI веков обусловлено изменением макроциркуляционных процессов, к числу которых относится антициклогенез, имеющий генетическое происхождение от развития блокирования по описанной здесь схеме. Пример эффекта образования гребневых структур наглядно виден на совместных картах приземного давления и $OT_{500/1000}$, на которых представлены синоптические процессы за период с 06.01.2002 г. по 18.01.2002 г. Анализ барического поля показывает, что Северная Атлантика, Скандинавия и Восточная Европа 06.01.2002 г. заняты обширной депрессией, а гребневая структура прослеживается над территорией Западной Европы и узкой зоной через Северную Атлантику протягивается в сторону Гренландии. В ситуации за 15.01.2002 г. чётко видна гребневая структура, на карте относительной топографии, простирающаяся от Азорского максимума вплоть до северных широт Скандинавии, которая полностью исчезает на карте 16.01.2002 г. Одновременно быстро возникает гребневое вторжение в направлении о. Колгуев, которое в ситуации за 18.01.2002 г. переходит в гребневую структуру, распространяющуюся до о. Ян-Майен. Однако, гребневые очаги на карте OT , находящиеся к западу от барических ложбин, приводят к заполнению этих ложбин и, как следствие, способствуют проникновению гребневых отрогов на территорию, ранее занимаемую ложбинами или циклонами. Зональное смещение гребневой структуры в процессах за 15.01.2002 г. осуществляется от Скандинавского полуострова к востоку, а затем 18.01.2002 г. происходит обратное движение к западу. Направление движения волны Россби к западу следует объяснить увеличением её амплитуды, которое первоначально приводит к стационарированию волны Россби, а далее к её переходу, в некоторых ситуациях, в стадию солитона Россби.

Целью исследования является разработка теоретических схем волнового процесса, приводящего к развитию блокирования циклонов у восточной границы территории Украины.

Методы и результаты исследований. Решение задачи моделирования рассматриваемого процесса определяется двумя основными моментами:

- 1) моделирование типовой волны Кельвина с определением ее амплитуды;
- 2) рассмотрение условий отрыва ее неустойчивой части с последующим переходом в волновой комплекс инерционных волн Россби.

Первый момент не вызывает особых затруднений. В [2] приведена математическая модель волн Кельвина, разработанная на основе волнового уравнения в полярной системе координат:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t} + 4\omega^2\right)\frac{\partial z}{\partial t} = gh\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \Theta^2}\right)\frac{\partial z}{\partial t}, \quad (1)$$

где (r, Θ) - полярные координаты в области решения Ω , которая расположена в секторе между северным полюсом и широтой субтропического региона;

ω - угловая скорость вращения Земли;

z - высота уровня эквивалентно - баротропного слоя атмосферы или превышение высоты свободной поверхности;

g - ускорение силы тяжести;

$h+z$ - глубина эквивалентно - баротропного океана.

Решение уравнения (1) представим в виде ряда Фурье - Бесселя, в котором коэффициенты ряда Фурье-Бесселя определяют функциональную конфигурацию волны Кельвина и связанных с ней потенциальных термодинамических сил:

$$z(r, \Theta, t) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M J_m(\lambda_{m,n}r) \cdot (A_{m,n} \cos(m\Theta) \cos(\sigma_{m,n}t) + B_{m,n} \sin(m\Theta) \sin(\sigma_{m,n}t)), \quad (3)$$

где $\sigma_{m,n}$ – собственные частоты для волнового вектора (m, n) ;

J_m - функции Бесселя первого рода; $\lambda_{m,n}$ - корни функции Бесселя первого рода;

m - индекс функции Бесселя; n – номер корня.

Согласно (3), имеем возможность полностью смоделировать типовую волну Кельвина и определить её амплитуду, что в дальнейшем даёт возможность рассмотреть процесс отрыва её неустойчивой составляющей (только в общем виде) в волновой комплекс инерционных волн Россби.

Для более детального рассмотрения такого процесса, что отмечено вторым пунктом, необходимо учитывать, что спектр собственных частот $\sigma_{m,n}$ должен быть более четко обозначен, поскольку (1) определяет его только для волновых чисел n в виде:

$$\sigma_n^2 = \frac{n^2 - 4\omega^2}{gh},$$

что является, в целом, грубым приближением к реальным частотам.

С этой целью, следуя [3], запишем уравнения для комплексных компонент ($V = v_\varphi - iv_\theta$; $U = v_\varphi - iv_\theta$) скорости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} - 2a\omega \cos\Theta V &= \frac{i}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \Theta}, & \frac{\partial U}{\partial t} + 2a\omega \cos\Theta U &= \frac{i}{a \sin\Theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi}, \\ \frac{\partial V}{\partial \Theta} + ctg\Theta V + \frac{\partial U}{\partial \Theta} + ctg\Theta U - \frac{i\rho_0 g}{2aP_0} \frac{\partial H_s}{\partial \Theta} (V + U) + \frac{\rho_0 B}{P_0} \frac{\partial \Phi}{\partial t} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где Φ – геопотенциал уровня 500 гПа; a - радиус Земли;

(v_φ, v_θ) - компоненты вектора скорости в сферической системе координат (Θ, φ) ;

Θ - дополнение широты, φ - азимутальный угол или долгота;

ρ_0, P_0 - плотность и давление на уровне моря; H_s - высота рельефа;

B – параметр баротропности.

Система (4), в отличие от системы (2), записана для эквивалентно – баротропного слоя, но с учётом потенциала скорости и рельефа, что позволяет существенно уточнить спектр собственных частот волн Кельвина. Значения собственных частот волн Кельвина представлены для сферической поверхности (отрицательные величины означают частоты неустойчивых волн):

$\sigma_1^2 = -9,85 \cdot 10^{-10}$; $\sigma_2^2 = 44,39 \cdot 10^{-10}$; $\sigma_3^2 = -42,5 \cdot 10^{-10}$; $\sigma_4^2 = -170,17 \cdot 10^{-10}$; т.е. $\sigma = i\sigma'$; $\sigma^2 = -\sigma'^2$;

именно неустойчивые волны Кельвина могут отпускать верхнюю часть в инерционное прогрессивное движение по типу волн Россби. При условии достижения такой волной меридиональной амплитуды, которая будет оказывать влияние на скорость движения, она может стационаривать, а ее длина будет определяться выражением:

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{4\pi U}{\beta}},$$

где U – скорость зонального переноса; β - параметр Кориолиса.

В дальнейшем стационарировавшая волна Россби может перейти в стадию солитона Россби, в случае наличия условий для вихревого баланса, а также при обеспечении достаточного притока скрытой энергии конденсации от фронтальных облачных систем блокированного циклона. Кроме того, энергетический баланс солитона дополняется притоком энергии от оптически толстых слоев атмосферы, поглощающих радиацию в длинноволновом и коротковолновом диапазонах.

Согласно [4], уравнение баланса радиационных потоков в безразмерном виде для оптически толстого слоя можно представить в виде:

$$(T^4 - 1 - z_0(T_1^4 - 1)) + \frac{\gamma}{(\gamma - 1)Pr}(T - 1 - z_0(T_1 - 1)) = \frac{1}{2}A\gamma(z_0 - u^2), \quad (5)$$

а для оптически тонкого слоя в безразмерном виде уравнение энергетического баланса запишем в форме:

$$\frac{3}{2} \left(\frac{1}{2}(T_1^4 + 1)(z_0^2 - z_0) + \int_0^z I_R dz_0 - \int_0^1 I_R dz_0 \right) + \frac{\gamma}{(\gamma - 1)Pr}(T - 1 - z_0(T_1 - 1)) = \frac{1}{2}A\gamma(z_0 - u^2), \quad (6)$$

где $I_R = \int_0^1 T^4(z_0) dz_0 - \int_0^z T^4(z_0) dz_0$;

T, T_1 - температура у поверхности земли и на верхней границе соответственно;

γ - отношение теплоемкостей; u - скорость ветра;

z_0 - высота над уровнем моря, пропорциональная потенциальной энергии;

A - коэффициент связи механических энергий с энергией излучения;

Pr - число Прандтля.

Тогда модель пограничного слоя в структуре солитона Россби представляет собой радиационный пограничный слой, в который можно ввести дополнительный приток скрытой энергии. Дополняя модель радиационного пограничного слоя уравнениями движения, получим профиль Экмана, характерный для гребневой структуры блока:

$$u = \frac{1 + \alpha(chH - 1)}{shH} shHz' - \alpha(chHz' - 1),$$

где α, H - числовые параметры, характеризующие интенсивность процесса;

z' - высота пограничного слоя.

Решение дает максимальное значение скорости в середине слоя (1000 – 700 гПа), а также $u=0$ на нижней границе и, соответственно, краевым условиям, $u = 1$ на верхней границе. Профиль скорости u должен в основной зоне энергетических притоков (зоне фронтов) переходить в профиль скорости токов вовлечения, рассчитанных согласно интегральному уравнению А. Аракавы [5]:

$$\int_0^{\lambda_{\max}} m_B(\lambda') K(\lambda, \lambda') d\lambda' + F(\lambda) = 0, \quad (7)$$

где m_B - вовлекаемая в облачные системы фронтов масса воздуха; λ - скорость вовлечения; $K(\lambda, \lambda')$ - ядро интегрального уравнения;

$F(\lambda)$ - интегральная масса вовлечения для всего облачного слоя.

Таким образом, энергия пограничного слоя в зоне антициклонического вихря солитона Россби объединяется с основным источником энергии солитона, находящегося в зоне фронтов блокированного циклона. Весь энергетический баланс солитона представляет собой единую взаимосвязанную систему, в которой радиационные потоки (5)–(6), выраженные через кинетическую энергию [5], сочетаются с потоками скрытой энергии конденсации, в данном случае взаимосвязанными с кинетической энергией токов вовлечения.

Для параметризации функции тока в солитоне, согласно [6,7,8], будем использовать уравнение Картвега – де – Фриза:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} - 6\psi \frac{\partial \psi}{\partial Z} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial Z^3} = 0, \quad (8)$$

где $Z = x + iy$ – комплексная координата;
 ψ - функция сложного комплекса многосолитонного решения, которое, согласно [9], может быть представлено посредством аналитической мероморфной функции комплексного потенциала скорости:

$$w = \bar{v}_\infty Z + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n q_k \ln(Z - a_k) - \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^p \frac{M_k e^{a_k i}}{Z - c_k} - \frac{i}{2\pi} \sum_{k=1}^m \Gamma_k \ln(Z - b_k) \quad (9)$$

где a_k, b_k, c_k - комплексные координаты полюсов;
 M_k, q_k, Γ_k - интенсивности полюсов; v_∞ - сопряжённая комплексная скорость.

Подставляя в уравнение (8) функцию тока потоков, образующихся в солитоне (9), получаем в правой части невязку уравнения (8). Метод расчёта функции тока по комплексному потенциалу скорости и полюсам вихреисточников и диполей изложен в [10].

Коррекция функции тока, вводимая методом согласования полюсов по интенсивности вихреисточников и моментов диполей с энергетическим балансом всей системы солитона, выраженным посредством уравнений (5 – 7), позволяет дополнить баланс энергетических потоков. Корректируя функцию тока в процессе вовлечения, можем, тем самым, уточнить энергетический баланс в зоне фронтальных разделов. Эта же процедура, выполненная в зоне радиационного пограничного слоя межфронтального пространства, позволяет учесть баланс механической энергии в радиационном пограничном слое солитона.

На рисунках а) – з) приведены результаты расчёта динамики волнового процесса от волны Кельвина к солитону Россби и энергетической коррекции его структуры. На рис. а) представлен вид неустойчивой волны Кельвина, расположенной над акваторией восточной Атлантики и побережья Западной Европы. Функция тока удовлетворяет условиям геострофичности. Модуль скорости соответствует градиенту функции тока. На рис. б) приведен результат отрыва неустойчивого гребня волны Кельвина в систему прогрессивного движения волн Россби, а на рис. в) представлена стационарная волна Россби с гребнем в субполярной области. Далее, на рис. г), дана начальная стадия перехода стационарной волны Россби в солитон Россби, а на рис. д) - функция тока отклонений от структуры солитона, представленного на рис. г). На рис. е) приведена функция тока солитона Россби, после первой коррекции полюсов. Отклонения от структуры солитона с учетом энергии конденсации водяных паров в системе фронтальных разделов блокированных циклонов отмечены на рис. ж). Окончательно на рис. з) приведены отклонения от структуры солитона, полученные после согласования кинетических энергий фронтальных систем и радиационного пограничного слоя в гребневой структуре солитона.

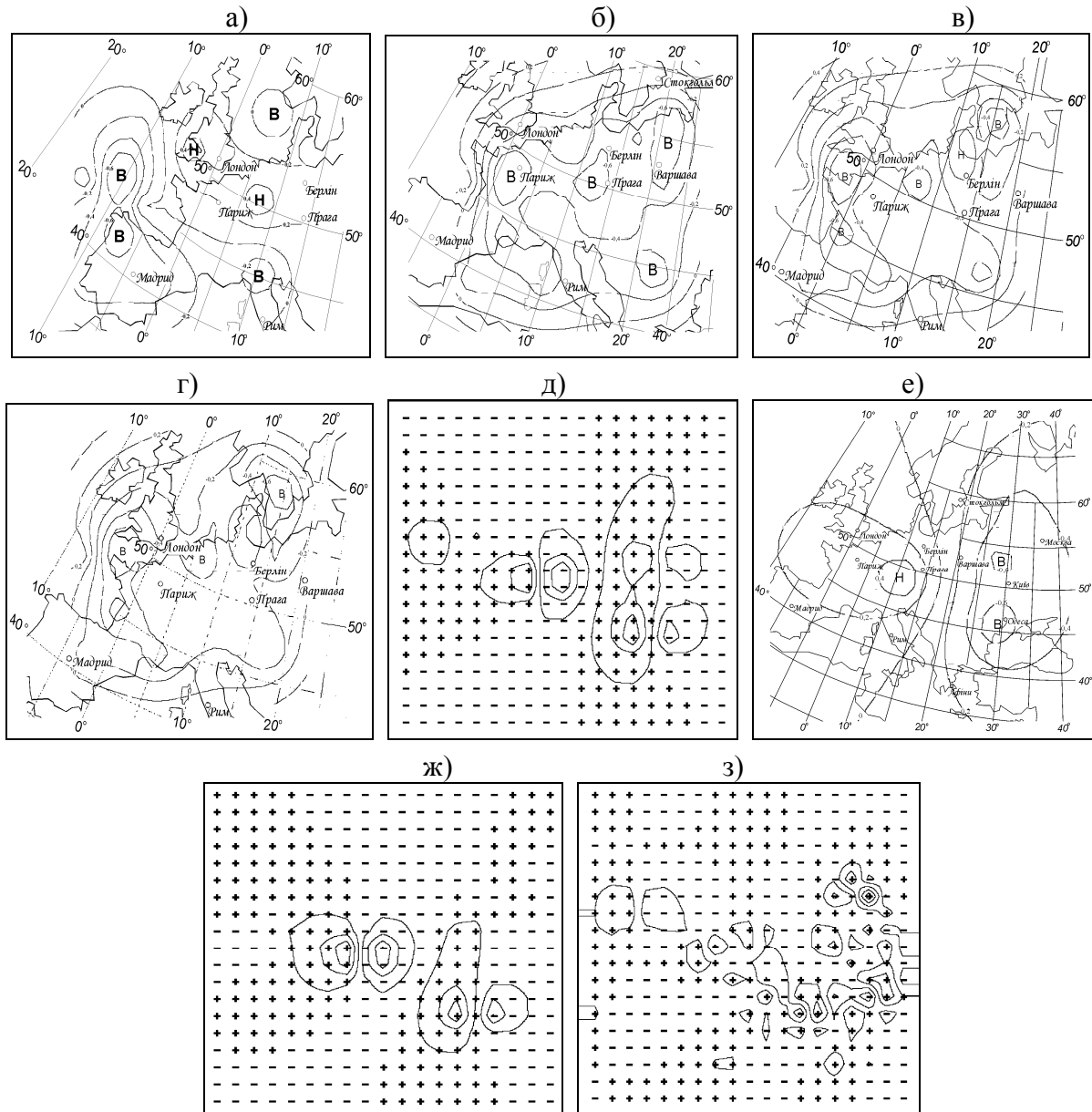


Рисунок. - Поля функции тока (а, б, в, г, е) и ее отклонения (д, ж, з) от структуры солитона при расчете динамики волнового процесса:

а) волны Кельвина; б) переход неустойчивой волны Кельвина в волну Россби; в) стационарная волна; г) блокирование солитоном Россби; е) солитон Россби после коррекции баланса энергии; д) отклонение от структуры солитона Россби; ж) отклонение от структуры солитона Россби после коррекции скрытой энергии; з) отклонение от структуры солитона Россби после окончательной коррекции конденсации и оптических толщин.

Положительные (отрицательные) значения функции тока обозначены знаком «+» («-») и расположены справа (слева) от направления движения воздушных масс. Как видно, отклонения имеют мелкоочаговый характер, который можно объяснить отличиями ландшафтов местности, способных оказывать локальные влияния на синоптический процесс [1]. Таким образом, цепь волновых процессов от волн Кельвина до солитона Россби, в ряде случаев, определяет основу блокирования циклонических траекторий над территорией юга Восточной Европы.

Выводы: 1. Процесс блокирования представлен в форме математической модели, основанной на волновой механике от волн Кельвина до солитона Россби, при этом учтены все формы энергетического баланса в изложенном волновом механизме.
2. Энергетический совместный баланс гребневой структуры блока и фронтальных систем блокированного циклона связан посредством объединённой кинетической энергии всей энергоёмкости солитона Россби.
3. Кинетическая энергия токов вовлечения в облачные системы фронтов, создаваемых конвекцией и скрытой теплотой конденсации паров, в гребневой составляющей солитона объединена с кинетической энергией радиационного пограничного слоя, что позволяет оценить энергетический баланс всей системы в одинаковых единицах для разнородных физических процессов.

Список литературы

1. Ивус Г.П., Ефимов В.А. Физика антициклогенеза. – К.: КНТ, 2005. - 208 с.
2. Грей Э., Метьюз Г.В. Функции Бесселя и их приложения к физике и механике. - М.: ИЛ. 1953, - 372 с.
3. Ефимов В.А. Математическое моделирование долговременных нестационарных планетарных процессов в системе океан – атмосфера // Труды ААНИИ. - 1976. – Т. 336.- 275 с.
4. Бай Шу-и. Динамика излучающего газа.- М.: Мир.- 1968. – 324 с.
5. Arakava A., Schubert W.H. Interaction of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment // P.I.J. Atm. Sci. -1974 - №3, Vol. 31. - P.674-701.
6. Benney D.J. Long non-linear waves in fluid flows // J.Math. And Phys.- 1966.- Vol.45.- P.52-63.
7. Long R.R. Solitary waves in the westerlies. // J. Atmos. Sci.- 1964 - Vol.21, – P.197-200.
8. Абловиц М., Сигур Х. Солитоны и метод обратной задачи. - М: Мир. - 1987.- 480 с.
9. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. - М.: ГИТТЛ. - 1948, Т. 1. - 487 с.
10. Ефимов В.А., Конкин В. Аналитическое представление струй штормового ветра и его применение в морских прогнозах // Метеорология, климатология и гидрология. - 1998.- Вып.35.- С. 20 – 26.

Окремі випадки блокування зональних переносів над територією України.

Ивус Г.П., Єфімов В.А., Грушевський О.М.

Обґрунтовується теоретична схема механізму утворення солітону Россбі з початкової стадії розвитку хвильового процесу у вигляді хвилі Кельвіна, її трансформації у прогресивну хвилю Россбі та подальшого переходу у стадію стаціонарної хвилі Россбі. Перетворення стаціонарної хвилі Россбі в солітон Россбі розглядається за допомогою аналізу основних фізичних причин поточної енергетичної перебудови хвильового процесу.

Ключові слова: хвиля Кельвіна, хвиля Россбі, блокування, солітон Россбі.

Special blocking situations of zonal transfer above territory of Ukraine.

Ivus G.P., Yefimov V.A., Grushevsky O.N.

Theoretical scheme of mechanism of formation of Rossby's soliton from the initial stage of development of wave process in the type of Kelvin's waves, transformation into the progressive Rossby's wave with the next change in to the stage of stationary Rossby's wave is given proof. Transformation of the stationary Rossby's wave into Rossby's soliton is considered with the help of the analysis of the main physical reasons of the energy change of the wave process which place.

Key words: Kelvin's wave, Rossby's wave, blocking, Rossby's soliton.