

ПОТЕНЦИАЛ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НАД СЕВЕРНЫМ ПРИЧЕРНОМОРЬЕМ

Предлагается метод учета потенциальных влагозапасов почвенного слоя при формировании мезомасштабных атмосферных процессов над территорией северного Причерноморья. Исследуется реакция модели процесса на изменение потенциала влагосодержания.

Ключевые слова: влагосодержание подстилающей поверхности, ряд Лорана, задача Дирихле.

Постановка проблемы. Территория северного Причерноморья по условиям увлажнения относится к сухому макрорайону со значениями гидротермического коэффициента Селянинова $ГТК < 0,7$ и комплексного показателя увлажнения Шашко $Мд < 0,17$ [1]. В то же время является совершенно очевидным факт малоэффективности этих показателей для детальной оценки ресурсов увлажнения и их влияния на формирование атмосферных процессов на территориях с неоднородной подстилающей поверхностью, к которым относится территория северного Причерноморья.

Характер подстилающей поверхности оказывает значительное влияние на эволюцию мезомасштабных атмосферных процессов. С орографией, например, связаны деформация потоков промежуточных масштабов, эффекты увеличения облачности и осадков на наветренной и, напротив, их уменьшение на подветренной стороне.

Термическая неоднородность подстилающей поверхности оказывает влияние на эволюцию фронтальных облачных систем (увеличивая степень их неоднородности), сообщая дополнительный импульс развитию конвекции и, тем самым, обуславливая различную интенсивность выпадения осадков.

Целью данной статьи является разработка методики учета влияния неоднородности влагосодержания подстилающей поверхности на формирование мезомасштабных атмосферных процессов над территорией северного Причерноморья.

Материалы и методика исследования. Рассмотрим водный запас почвенного слоя через потенциал влагосодержания, который расходуется на турбулентный поток влаги в виде испарения в приземном слое и на поддержание влажной конвекции, согласно ее описания [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial p} \theta_e(T + \delta T, q + \delta q, p) &= 0; \\ q + \delta q &= \gamma_a q_s(T + \delta T, p) = 0; \\ \frac{1}{g} \int_{p_H}^{p_B} (c_p \cdot \delta T + L \delta q) dp &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где θ_e - эквивалентно-потенциальная температура; $\theta_e = \theta \exp\left(\frac{Lq}{c_p T}\right)$;

q_s - насыщающее отношение смеси; L - скрытая теплота конденсации;

p_H, p_B - давление на верхней и нижней границе слоя конвекции;

T, p, q - температура, давление и отношение смеси;

g - ускорение силы тяжести; δT - малые приращения температуры;

c_p - удельная теплоёмкость при постоянном давлении.

Существует следующая зависимость между θ_e и статической энергией влажного воздуха

$$\frac{(c_p + gz + Lq)}{c_p \frac{T}{\theta_e} \frac{\partial \theta_e}{\partial p}} \approx - \frac{\partial}{\partial p} (c_p T + gz + Lq), \quad (2)$$

где z - высота соответствующего уровня над уровнем земной поверхности. Условие (1) соответствует влажной адиабате, а вертикальный градиент представляется в виде

$$\gamma'_a = \frac{\gamma_a + 0,622 \frac{L}{c_p} \frac{E}{p} \frac{g}{RT_e}}{1 + 0,622 \frac{L}{c_p} \frac{1}{p} \frac{dE}{dT_i}}, \quad (3)$$

где L – удельная теплота парообразования; γ_a – сухоадиабатический градиент;
 c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении;
 E – давление насыщенного водяного пара;
 R – удельная газовая постоянная сухого воздуха;
 T_i, T_e – температура частицы и окружающего воздуха соответственно.

В (3) значение вертикального градиента температуры $\gamma_a=0,8^\circ\text{C}/100\text{м}$, что более реально соответствует условиям влажной конвекции. В целом, значения γ_{cp} , при которых реализуются процессы конвекции над территорией Украины, приведены в табл.1.

Таблица 1 – Средние градиенты температуры в слое с *Сu*-конвекцией над Украиной

Слой, км	0 - 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 1,5	1,5 - 2,0	2,0 - 2,5	2,5 - 3,0	> 3,0
$\gamma_{cp}, ^\circ\text{C}/100\text{м}$	1,04	0,80	0,79	0,66	0,66	0,62	0,49

Согласно [4], почвенный влагозапас представим в виде потенциала влагосодержания, который можно представить на комплексной плоскости координатной системы $z = x + iy$ разложением в ряд Лорана в конкретной точке области решения

$$\Pi_B = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n (z-a)^n; \quad c_n = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(\zeta) d\zeta}{(\zeta-a)^{n+1}}, \quad (4)$$

где ζ – комплексная координата границы;
 a – координата источника влаги на области решения;
 C – контур, охватывающий область решения.

Фактически ряд Лорана, в конкретной точке области решения, представляет собой сочетание мультиполей, но в первом приближении можно использовать алгоритм [5, 6] с привлечением методов теории плоского поля с помощью функции комплексного

потенциала скорости. Поле потенциала скорости определим с помощью n простых источников, определенных в точках a_1, a_2, \dots, a_n с обильностями q_1, q_2, \dots, q_n , а также m вихрями в координатах b_1, b_2, \dots, b_m с величинами циркуляций $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_m$ и диполями в координатах c_1, c_2, \dots, c_p с моментами M_k и углами ориентации осей диполей α_k .

$$w = \bar{v}_\infty z + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n q_k \ln(z - a_k) - \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^p \frac{M_k e^{\alpha_k i}}{z - c_k} - \frac{i}{2\pi} \sum_{k=1}^m \Gamma_k \ln(z - b_k). \quad (5)$$

Входными данными для расчета будут являться величины Γ_k, q_k, M_k , первая из которых отображает интенсивность циклогенеза, вторая и третья привязываются к термической структуре атмосферного фронта. Таким образом, мезомасштабные вихревые возмущения, обуславливаемые фронтом [7] и вносимые им в структуру циклона, связаны, в целом, с глубиной последнего. Под фоновым \bar{v}_∞ будем понимать ветер синоптического процесса над областью решения (территорией северного Причерноморья). С другой стороны, атмосферные фронты также можно представить и комбинацией (4).

Задача моделирования поля скоростей синоптических процессов с целью выявления зон локализации аномалий в полях ветра содержит в себе две составляющие. Первая, очевидно, заключается в необходимости моделирования потоков синоптического масштаба, которые есть своего рода фоновыми для развития процессов меньших масштабов и, в частности, процессов α, β – мезомасштаба.

Поскольку наш подход содержит аналитические функции комплексного переменного, то главная особенность его реализации будет заключаться в необходимости определения координат полюсов (особых точек) аналитических функций и их характеристик. Таким образом, задача первого этапа, в более узком понимании, сводится к выбору функции, которая бы отражала характер движения воздушных масс в системе циклонов и антициклонов. Функция $w = \ln(z-a)$ устанавливает две кинематические картины (изопотенциальных линий и линий тока), каждая из которых, с определенными ограничениями, описывает вышеупомянутое движение (рис.1).

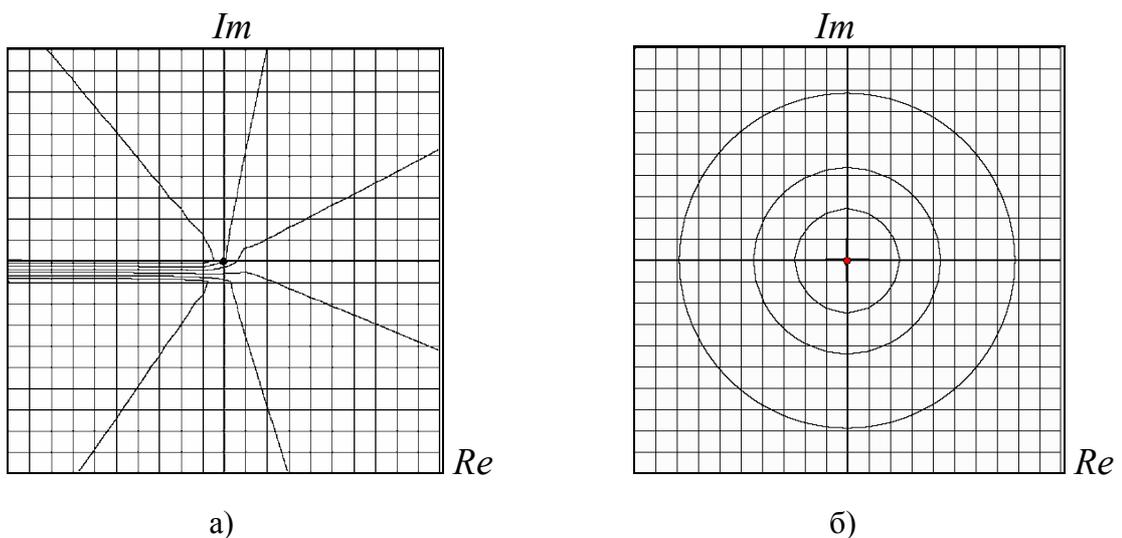


Рис. 1 – Система линий функции $w = \ln(z-a)$
 а) тока $w = \theta i$; б) изопотенциальных $w = \ln r$.

Система линий тока рис. 1а вообще точнее определяет движение воздуха в системе барических образований, поскольку в зависимости от знака вихревого источника, можно получить конвергенцию или дивергенцию воздушных потоков к центру барического образования или от него. Однако, численная реализация этого алгоритма порождает явление сингулярности не только в полюсе функции, но и по области решения, что в последующем существенно будет осложнять интерпретацию результатов. Именно поэтому является более целесообразным использование изопотенциальных линий функции (рис.1б), которые хотя и не учитывают влияние силы трения на характер движений, однако позволяют легче избежать явления сингулярности в полюсах и особых точках функции путем удаления определенного, априори известного, количества изолиний внутри полюса.

Вторая составляющая задачи будет заключаться в определении географической локализации полюсов (особенных точек). Для ее решения имеет смысл применять методику определения центров барических образований, то есть нахождения станции с минимальным значением геопотенциала внутри первой замкнутой изобары. Другим моментом является определение интенсивности вихревых источников. Для максимально корректного их расчета необходимо иметь поля вертикальной проекции относительного вихря скорости на заданном уровне и на их основании выставлять интенсивность полюсов.

Учитывая факт изменчивости направлений потоков промежуточных масштабов вдоль АФ является существенным учет направления циркуляции, что устанавливается смоделированными вихревыми структурами – он изменяется на противоположный при условии изменения знака момента диполя (источник $+m$ и сток $-m$ меняются местами). Это дает возможность задать в зависимости от типа фронта, стадии цикло-и фронтогенеза центростремительное или центробежное направление движения воздуха в области фронтальной зоны.

Для образованных вихревых движений будет характерной обратная положительная связь со скоростью мезомасштабных потоков в зонах АФ, поскольку движениям такого характера будет отвечать и другая величина и знак вектора вихря, то есть вихревые циркуляции за счет создания собственной тяги выступают своеобразными «катализаторами» процесса фронтогенеза.

Моделирование линий тока, которые создаются движениями синоптического масштаба в циклоне, выполним, используя свойства аналитической функции $w = \ln z$.

Отметим, что величина моментов диполей как на теплом, так и на холодном фронте бралась одинаковой, хотя такое предположение и выглядит несколько модельным. Вместо этого, расположения источников и стоков массы относительно линии фронтального раздела для теплого и холодного фронтов брались противоположными и ориентировались таким образом, чтобы угол оси диполя с линией фронта составлял приблизительно 90° . Именно поэтому в нашем случае углы ориентации диполей составляют $\alpha_1 = 20^\circ$ на теплом фронте, $\alpha_2 = 300^\circ$ - на холодном.

Сглаживание функции (5) выполним по опыту подобных операций, изложенному в работах [5], когда особые точки в полюсах функции устраняются приближением функции комплексной скорости классом гармонических функций, в которых бывшие координаты особых точек представляют собой конформное отображение гармонической функции в мультиполях согласно теории потенциала, изложенной в [4].

Для области решения определим задачу Дирихле, полагая функцию комплексной скорости, после сглаживания её особых точек в полюсах, гармонической. Выражения (1), (3) определяют зоны влажной конвекции, а (4), (5) указывает места их локализации. Решение задачи Дирихле задаётся для функции $f(z; z_0)$, которая осуществляет взаимно однозначное конформное отображение области решения на

единичный круг. Эта функция зависит от выбора z_0 , которая совпадает с местом действия модели (1), (2). Тогда функция Грина будет представлена

$$g(z, z_0) = \ln \frac{1}{|f(z; z_0)|}. \quad (5)$$

Если на границе задана произвольная действительная функция $\tilde{u}(\zeta)$, где ζ - комплексная координата границы, то решение задачи Дирихле получим в виде

$$u(z) = \frac{1}{2\pi} \oint_C \tilde{u}(\zeta) \frac{\partial g(\zeta; z)}{\partial n} d\zeta. \quad (6)$$

Результаты исследования. Получение решения (6) привяжем к рассмотрению следующей типовой синоптической ситуации. По северной периферии Черного моря расположим фронтальный раздел, связанный с циклоном с центром над Румынией. При этом, его дальнейшее движение на восток блокирует гребень антициклона, распространяющийся на территорию Украины с Черного моря. С целью определения реакции модели на неоднородности подстилающей поверхности, согласно (5), введем особую точку z_0 , локализация которой будет соответствовать (1), (3). Координаты и интенсивность полюсов функции (5) по расчетной области приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета функции (5)

Синоптические вихри $w = \ln r$				Мезомасштабные вихри (фронт) $w = -\sum_{i=1}^k \frac{M_k e^{\alpha_k i}}{2\pi(z - a_k)}$				
№ п/п	Интенсивность	Координаты		№ п/п	Интенсивность M_k	Угол $\alpha_k, ^\circ$	Координаты	
		<i>Re</i>	<i>Im</i>				<i>Re</i>	<i>Im</i>
1	2,000	0,097	0,005	1	-2,000	320	-0,722	-0,579
2	-2,000	-0,694	-0,500	2	-2,000	320	-0,810	-0,667
3	-3,000	0,597	-0,514	3	-2,000	320	-0,931	-0,750
	-2,000	0,042	0,792	4	1,000	20	-0,546	-0,477
				5	1,000	20	-0,361	-0,537
				6	1,000	20	-0,250	-0,639
				7	1,000	20	-0,083	-0,745
				8	1,000	20	0,060	-0,815
				9	-3,000	300	0,227	-0,796
				10	-3,000	300	0,347	-0,718
				11	1,000	40	0,472	-0,644
				12	1,000	40	0,704	-0,509

Обоснование логичности выбора географической локализации особой точки в области прибрежной полосы состоит в следующем:

а) наличии благоприятных условий для возникновения мезомасштабных горизонтальных движений воздуха (наряду с вертикальным распространением водяного пара путем турбулентной диффузии);

б) формировании горизонтальных градиентов влажности воздуха, что способствует увеличению испарения.

Эти факторы облегчают формирование термиков, что, в свою очередь, способствует интенсификации конвективной деятельности при выходе линий конвекции с моря на сушу и увеличению повторяемости конвективных явлений в данном районе в целом.

На рис.2 приведен результат решения задачи Дирихле, представленный в виде функции тока.

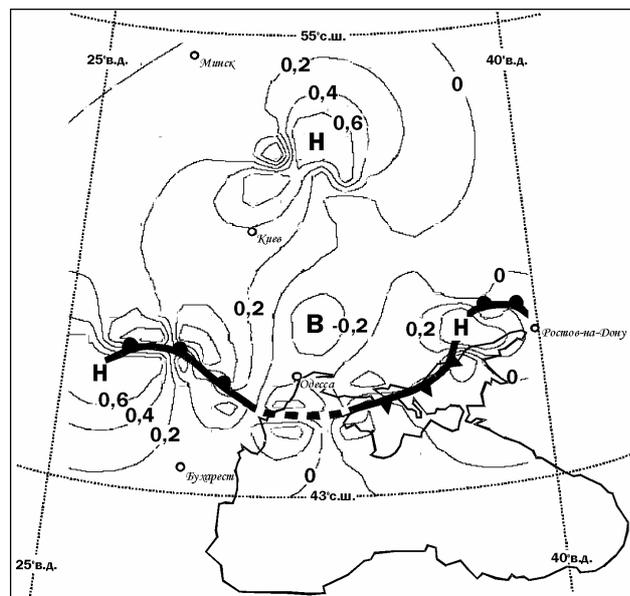


Рис.2 - Функция тока (в условных единицах) решения задачи Дирихле относительно потенциала влагосодержания для территории северного Причерноморья.

Видно, что фронтальный раздел за счет влагопереноса с запада прорывает гребень (место прорыва обозначено на рисунке пунктирной линией) и создает местный циклон в самой области гребневого блока. Фронтальная волна, поддерживаемая испарением влаги, возникает у акватории Азовского моря, где наиболее существенна разница в рассматриваемых свойствах подстилающей поверхности. По характеру мезомасштабных вихревых возмущений над северной частью Черного моря видно, что фронтальный раздел с западной границы области решения имеет тенденцию к объединению с фронтальной системой новой депрессии.

Результаты численного эксперимента, показывающие формирование линии фронта, проходящей по акватории Черного и Азовского морей, предполагает изменения в стратегии составления прогноза погоды. Главным образом, это относится к прогнозу конвективных явлений и учету их эволюции (например, трансформации «облачных канатов» в цепочки конвективных очагов с одновременным усилением конвекции).

В целом, результаты численного эксперимента позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Потенциал влагосодержания способен вызывать локальные очаги влажной конвекции, усиливающиеся с приближением к акватории моря вплоть до образования местных циклонов даже в зонах повышенного давления.

2. При выраженной роли потенциала влагосодержания вблизи морской акватории может наблюдаться возникновение добавочных центров в основной депрессии, что может привести либо к её регенерации, либо к возникновению частного циклона.

3. Потенциал влагосодержания почвенного слоя может привести к разрушению гребневого отрога и к проявлению линии полярного фронта в поле повышенного давления в виде его ветви, проходящей через акваторию Черного и Азовского морей.

Список литературы

1. Ляшенко Г.В. Агроклиматическое районирование Украины по условиям увлажнения // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.- 2005.- Вип. 49.- С. 274-284.
2. Теоретические основы прогноза погоды на средние сроки - Л.: Гидрометеоздат. Сборник переводных статей.- 1979.- 138 с.
3. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы.- Л.: Гидрометеоздат.- 1965.- 875 с.
4. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики.- М.: ГИФМЛ.- 1962.- 767 с.
5. Ефимов В.А. и др. Прогноз штормов и нажимного ветра по акватории Черного моря. // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.- 1998.- Вип. 35.- С.3 – 20.
6. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика.- М.: ГИТТЛ.- 1948.- т.1.- 487 с.
7. Joly A. The Stability of Steady Fronts and the Adjoint Method: Nonmodal Frontal Waves // J. Atmos. Sci.- 1995.- № 17, V.52.- P. 3082-3107.

Потенціал вологовмісту підстильної поверхні як механізм формування мезомасштабних атмосферних процесів над північним Причорномор'ям. Грушевський О.М., Пшеничний В.Н.

Пропонується метод врахування потенційних запасів вологи ґрунту на формування мезомасштабних атмосферних процесів над територією північного Причорномор'я. Досліджується реакція моделі процесу на зміну потенціалу вологовмісту.

Ключові слова: вологовміст підстильної поверхні, ряд Лорана, задача Діріхле.

Potential supplies of moisture of soil as mechanism of forming of mesoscale atmospheric processes above north coast of the Black sea. Hrushevsky O., Pshenichny V.

The method of account of potential supplies of moisture of soil layer at forming of mesoscale atmospheric processes above territory of north coast of the Black sea is offered. and also the reaction of model of process on the change of potential of moisture load is explored.

Keywords: moisture load of laying surface, the Loran's series, the Dyrykhle's problem.