

С.В. Грибановская

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ РОСТА ФРОНТАЛЬНОЙ ОБЛАЧНОСТИ

S.V. Gribanovskaya

NUMIRICAL TECHNIQUE OF FRONTAL CLOUD CHANGING CALCULATION

В статье описан разработанный автором метод расчета изменения ширины фронтальной облачности, который может лечь в основу объективного (численно-го) сверхкраткосрочного прогноза эволюции атмосферных фронтов и связанных с ними облачных систем. В предложенной автором методике учтены динамика атмосферного фронта, фронтогенеза и процессы облакообразования, таким образом, эволюции атмосферного фронта подверглась разностороннему анализу. Накоплен огромный массив данных, полученных с Метеорологических спутников Земли и данных традиционных синоптических наблюдений, использованный в качестве исходной информации для проведения численных экспериментов.

Ключевые слова: фронтальная облачная система, фронтогенез, сверхкраткосрочный прогноз, численные эксперименты.

Worked out numerical technique of frontal cloud changing calculation that can be used for the objective analysis and very short-range forecasting of the atmospheric front and related cloud system evolution is described in the paper by Gribanovsky S.V. Atmospheric fronts dynamics, frontogenesis and cloud formation process are taken into account by the author in the described technique. A lot of data obtained from the Meteorological Weather Satellites and traditional weather observation data was accumulated and used as the initial information for the numerical experiments.

Key words: frontal cloud system, frontogenesis, very short-range forecasting, numerical experiments.

Широкое внедрение вычислительной техники и комплексной автоматизации практически всех этапов анализа и прогноза погоды вынуждает исследователей разрабатывать новые методы прогноза на основе использования современной вычислительной техники или усовершенствовать и автоматизировать уже существующие методы прогноза и первичной обработки метеорологической информации. При этом отпадает необходимость осуществлять фронтальный анализ «вручную» (широко известная практика), а задача идентификации фронтальных разделов и фронтальных облачных полей может решаться однозначно различными метеорологическими центрами.

Так на службе Национального Агентства Океана и Атмосферы (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)) и Национальной службы спутниковых наблюдений и информации (National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS)) стоит система искусственных спутников земли. Система метеорологических спутников Земли NOAA состоит из двух типов метеорологических спутников: геостационарные управляемые спутники Земли (GOES), используемые для получения данных необходимых для целей краткосрочного и сверхкраткосрочного прогноза,

в том числе и «Nowcasting-a»); полярно-орбитальные спутники, информация с которых необходима для долгосрочных и среднесрочных прогнозов. Оба этих типа спутников необходимы для глобального мониторинга за погодой и климатом Земли.

Новые серии МСЗ GOES и полярно-орбитальных спутников разработаны для NOAA Национальным агентством по авиации и космическим исследованиям (NASA). Новые спутники GOES серии «I» и «M» производят информацию высокого временного и пространственного разрешения, это и спутниковые снимки облачного покрова, и полный объем данных радиозондирования атмосферы о вертикальном профиле температуры и ветра. Введенные в строй новые технологии позволяют специалистам всего мира разрабатывать наиболее точные и разносторонние прогностические системы. МСЗ GOES производит постоянные наблюдения за земной поверхностью необходимые для быстродействующих систем численного анализа погоды. Они вращаются вокруг Земли на геосинхронизированной орбите, т.е. по экваториальной проекции Земли со скоростью близкой к скорости вращения Земли, что позволяет спутнику находиться постоянно над одной точкой земной поверхности. Данная орбита находится на высоте 35800 км над земной поверхности, этой высоты достаточно, чтобы получить снимок целого полушария Земли. На геостационарной орбите расположенной над экватором Земли располагаются сразу два метеорологических спутника. Каждый спутник охватывает почти треть земной поверхности: один охватывает Северную и Южную Америку и большую часть Атлантического Океана; другой отслеживает Северную Америку и Тихий океан. МСЗ GOES-12 (GOES-East - название, также часто встречающееся в литературе) расположен над экватором на 75° З.Д., в то время как GOES-10 (GOES-West) находится на 135° З.Д. Вместе они дают изображение Земли и днем и ночью, покрывая площадь поверхности практически от 20° З.Д. до 165° в.д. И поскольку МСЗ имеет возможность находиться над одной (фиксированной) точкой поверхности, то он имеет возможность бдительно следить за синоптическими процессами, дающими начало таким опасным метеорологическим явлениям как торнадо, стихийными паводками, ураганами. Когда условия для возникновения опасных явлений успешно развиваются в данном регионе, МСЗ имеет возможность наблюдать за их развитием и отслеживать путь их перемещения.

Геостационарная система получения изображений земной поверхности из космоса может быть использована для обнаружения зоны осадков (дождя, снега или града) внутри грозового вала или урагана, также как и для наблюдения за состоянием и изменением снежного покрова. Полученные со спутника GOES данные помогают специалистам составлять предупреждения о стихийных паводках и снежных бурях, о состоянии границы снежного покрова земли. Спутниковая система отслеживает, ледяные поля и позволяет метеорологам составлять карты перемещения морского и озерного льда.

Доступность спутниковой информации позволила за последние 10 лет накопить огромный массив данных наблюдений за состоянием атмосферы. Массив содержит серии спутниковых снимков облачности в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн с временной дискретностью – 15 мин, высотные карты и карты погоды заданного района как действительные, так и расчетные. Разработанные компьютерные программы позволили осуществить привязку и масштабирование космического снимка и соответствующих им карт барической топографии (приземной карты по-

годы и АТ 850) так, чтобы точке на спутниковом снимке соответствовала точка на карте погоды и координаты этих точек были одинаковыми. В результате получена возможность подвергать дальнейшей обработке совмещенное изображение, содержащее карту погоды с нанесенными на нее контурами фронтальной облачности и положения приземной линии фронта. Программное обеспечение, разработанное с использованием логических, градиентных фильтров построено таким образом, чтобы в каждой точке (как спутникового снимка, так и соответствующей карты погоды) легко было определить необходимые метеовеличины и их градиенты (например, такие как потенциальная температура и скорость ветра). Используя интерактивный метод идентификации фронтальных разделов и автоматический метод идентификации границ фронтальной облачности [4] осуществляется определение положения приземной линии фронта и выделение границ облачной спирали с ним связанной.

Формулы, используемые для расчета фронтогенеза и фронтолиза, получаются путем простых преобразований из выражения для производной по времени от модуля градиента какой-либо скалярной характеристики. Скалярная величина, например, потенциальная температура (θ) зависит от координат x , y , z (ось z направлена вертикально вверх) и от времени t . Тогда для трехмерного индивидуального фронтогенеза запишем трехмерную фронтогенетическую функцию в следующем виде

$$F_3 = \frac{\theta_x}{\theta_n} \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{d\theta}{dt} - u_x \theta_x - v_x \theta_y - \omega_x \theta_z \right] + \frac{\theta_y}{\theta_n} \left[\frac{\partial}{\partial y} \frac{d\theta}{dt} - u_y \theta_x - v_y \theta_y - \omega_y \theta_z \right] + \frac{\theta_z}{\theta_n} \left[\frac{\partial}{\partial z} \frac{d\theta}{dt} - u_z \theta_x - v_z \theta_y - \omega_z \theta_z \right] \quad (1)$$

где θ – потенциальная температура; u , v , ω – составляющие скорости ветра, а буквенные индексы означают дифференцирование, а n – нормаль к изоповерхности $\theta = \text{const}$.

Поскольку θ – потенциальная температура, то первые слагаемые в каждой из квадратных скобок описывают эффект неадиабатических притоков тепла; если притоки тепла распределены неравномерно и градиент их имеет составляющую в направлении градиента θ , то такой неравномерный нагрев будет приводить к росту градиентов температуры, т.е. к фронтогенезу. Иначе говоря, фронтогенез имеет место, если неадиабатическое нагревание наблюдается в более теплом воздухе и (или) охлаждение – в более холодном. Вторые и третьи слагаемые в квадратных скобках описывают эффект сближения изолиний θ в результате переноса горизонтальным полем ветра. Их называют адвективными или конфлюэнтными членами. Наконец, четвертые слагаемые в квадратных скобках дают фронтогенетический эффект, если, например, в области теплого воздуха имеет более сильный перенос тепла конвекцией по вертикали, чем в области холодного воздуха. Эти конвективные члены описывают изгиб или наклон изоповерхности θ в результате неравномерных вертикальных смещений [6].

Применим для простоты один из частных случаев формулы индивидуального фронтогенеза является фронтогенез при плоском движении. В этом случае формула (1) примет следующий вид

$$F_2 = \frac{S_x}{S_n} \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{dS}{dt} - u_x S_x - v_x S_y \right] + \frac{S_y}{S_n} \left[\frac{\partial}{\partial y} \frac{dS}{dt} - u_y S_x - v_y S_y \right] \quad (2)$$

Созданное автором программное обеспечение позволяет для каждой точки исходного совмещенного изображения рассчитывать плоскую функцию фронтогенеза. Используя полученные значения можно строить поля пространственного распределения параметра фронтогенеза, что особенно важно при совместном анализе закономерностей перестройки поля фронтогенеза и изменения границ фронтальной облачности [1]. Существует тесная взаимосвязь фронтгенетических процессов и процессов облакообразования [2].

В качестве характеристик влияющих на облакообразование использовалось параметрическое представление притоков тепла и влаги, представленное в [5].

$$H_0 = \rho_h C \left| \vec{V}_h \right| (T_h - T_0), \quad (3)$$

$$Q_0 = -\rho_h f C_n,$$

где величины с индексом 0 и h относятся к земной поверхности ($z = 0$) и верхней границе приземного подслоя ($h \approx 50$ м), в котором вертикальные потоки постоянны; f - относительная влажность воздуха; \vec{V} - горизонтальный вектор скорости ветра; C и C_n - безразмерные коэффициенты (коэффициенты сопротивления), подбираемые эмпирическим путем. Обычно коэффициенты сопротивления берут равными $C = 0,003$, $C_n = 0,76$ [4], хотя эти коэффициенты зависят от числа Ричардсона и могут быть рассчитаны по следующей формуле

$$Ri \frac{g}{\beta^2 \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{g}{\beta^2 T} (\gamma_a - \gamma), \quad (4)$$

где $\beta^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2$.

Эта зависимость такова, что вклад турбулентных членов в формирование вертикальных потоков увеличивается при уменьшении числа Ri .

В качестве ширины фронтальной облачности рассматривается расстояние между точками на границах фронтальной облачности (тыловой и передней границы). Координаты этих точек определяются пересечением границы фронтальной облачности и прямой сонаправленной с направлением перемещения приземной линией фронта. Процедура определения скорости и направления перемещения приземной линии фронта разработана на кафедре ЭФА РГГМУ [3] и использовалась для проведения на спутниковом снимке линии параллельной перемещению приземной линии фронта до пересечения с идентифицированными границами облачной полосы. Используя

полученные координаты, в точках на высотных картах рассчитывались плоский параметр фронтогенеза, потоки тепла и влаги, градиент температуры.

При этом потоки тепла [К/м²сек], горизонтальный параметр фронтогенеза [К/мсек] и горизонтальный градиент температуры [К/м] являются температурными характеристиками, где горизонтальный параметр фронтогенеза и горизонтальный градиент температуры зависят от горизонтального распределения температуры, а поток тепла характеризует ее вертикальную изменчивость. Поток влаги является только влажностной характеристикой [г/м²сек] и играет наиважнейшую роль в процессе эволюции облачных массивов в целом и фронтальных облачных систем в частности.

Исходя из выше сказанного, целесообразным представляется объединение и представление перечисленных характеристик в виде формулы, предназначенной для определения изменения ширины фронтальной облачной полосы.

Для этого обозначим:

- изменение ширины фронтальной облачной полосы вдоль направления перемещения линии фронта за 3, 6, 9 часов в зависимости от заблаговременности как $\partial S/\partial t$;
 - скорость роста фронтальной облачной полосы вдоль направления перемещения приземной линии фронта как $V_{\partial t}$;
 - градиент горизонтального параметра фронтогенеза вдоль линии, соединяющей две соседние характерные точки контура фронтальной облачной полосы как $\partial F/\partial S$;
 - горизонтальный градиент температуры вдоль линии, соединяющей две соседние характерные точки контура фронтальной облачной полосы как $\partial T/\partial S$;
 - изменение потоков тепла и влаги на границах фронтальной облачности как $\Delta Q_0, \Delta E_0$ соответственно, причем так, что $\Delta Q_0 = (Q_0)_{i+1} - (Q_0)_i$, а $\Delta E_0 = (E_0)_{i+1} - (E_0)_i$. При этом величина $(Q_0)_{i+1}$ вычисляется на передней границе фронтальной облачной полосы, а $(Q_0)_i$ соответственно на тыловой границе. Такая же процедура расчета необходима и для определения значения ΔE_0 ;
 - плотность воздуха на высоте приземного подслоя (т.е. на высоте $\approx 50 - 100$ м) как ρ_h .
- Тогда полученная нами формула примет следующий вид:

$$V_{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial t} = \left[k_1 \left(\frac{\partial F_2}{\partial S} + \Delta Q_0 \right) + k_2 \frac{\partial T}{\partial S} \right] \frac{\Delta E_0}{\rho_h} \quad (5)$$

Анализ размерностей, приведенных выше, позволил ввести в формуле (5) размерные эмпирические коэффициенты k_1, k_2 . Очевидно, эти коэффициенты должны иметь следующие размерности:

$$k_1 = [\text{м}^2 \cdot \text{сек} / \text{К}], \quad k_2 = [\text{м} / \text{К}].$$

Следовательно, каждое слагаемое в квадратных скобках уравнения (5), а именно $k_1 \left(\frac{\partial F}{\partial S} + \Delta Q_0 \right)$ и $k_2 \frac{\partial T}{\partial S}$, является безразмерной величиной, а член за скобками (т.е. $\Delta E_0/\rho_h$) имеет размерность [м/сек], следовательно, такую же размерность имеет и $\partial S/\partial t$.

Таким образом, предложенная формула (5) для определения скорости роста фронтальной облачной полосы вдоль направления перемещения приземной линии фронта объединяет в себе параметры, характеризующие непосредственно фронтогенетические процессы на фронте, с которым связана эта облачная масса, а именно: горизонтальный параметр фронтогенеза, горизонтальный градиент температуры; с параметрами, характеризующими эволюцию самой фронтальной облачности, такими, как потоки тепла и влаги. Следовательно, формула (5) показывает количественную связь между фронтогенетическими и облакообразующими процессами. Формула учитывает суточный и годовой ход величин, входящих в модель, кроме того, посредством параметризации потоков тепла и влаги формула позволяет учесть влияние орографии.

Влиянии параметра фронтогенеза на формирование и изменение горизонтальных и вертикальных размеров фронтальных облачных полей изучено автором, а результаты представлены в работе [1]. Хотя величина параметра фронтогенеза на два порядка ниже, чем притоков тепла и влаги, практика показывает, что фронтогенетические процессы оказывают сравнимое с вертикальными притоками тепла и влаги влияние на эволюцию фронтальных облачных полей.

Поэтому, при определении эмпирического коэффициента k_1 , прежде всего, необходимо определить порядок его величины.

Так как горизонтальный градиент параметра фронтогенеза вдоль направления перемещения общей точки фронта имеет порядок $10^{-5} \left(\frac{\partial F}{\partial L_{cl}} \approx 10^{-5} \left[\frac{\text{К}}{\text{м}^2 \text{сек}} \right] \right)$, а контраст потоков тепла на границах фронтальной облачности имеет порядок $10^{-3} \left(k_1 \approx 10^3 \left[\frac{\text{М}^2 \text{сек}}{\text{К}} \right] \right)$.

Значение этого коэффициента может зависеть от горизонтального распределения температуры и ветра, однако эмпирическим путем была найдена зависимость значения k_1 от контраста скорости ветра на границах фронтальной облачной полосы.

Так были найдены два условия, влияющие на значение эмпирического коэффициента k_1 :

$$\begin{aligned} 1) \left(\left| \bar{V}_{50} \right|_{i+1,j} - \left| \bar{V}_{50} \right|_{i,j} \right) &\leq 2,5 \frac{\text{М}}{\text{сек}}, \\ 2) \left(\left| \bar{V}_{50} \right|_{i+1,j} - \left| \bar{V}_{50} \right|_{i,j} \right) &> 2,5 \frac{\text{М}}{\text{сек}}. \end{aligned} \tag{6}$$

В ходе численных экспериментов по определению оптимального значения коэффициента как для случаев когда $\left(\left| \bar{V}_{50} \right|_{i+1,j} - \left| \bar{V}_{50} \right|_{i,j} \right) \leq 2,5 \frac{\text{М}}{\text{сек}}$, так и для случаев $\left(\left| \bar{V}_{50} \right|_{i+1,j} - \left| \bar{V}_{50} \right|_{i,j} \right) > 2,5 \frac{\text{М}}{\text{сек}}$ значения k_1 брались в интервале от $10^3 [\text{м}^2 \text{сек}/\text{К}]$ до $3 \cdot 10^3 [\text{м}^2 \text{сек}/\text{К}]$ с шагом $0,5 \cdot 10^3 [\text{м}^2 \text{сек}/\text{К}]$. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

При условии сдвига ветра меньше $2,5 \text{ м/сек}$, оптимальное значение эмпирического коэффициента оказалось равным $k_1 = 2,5 \cdot 10^3 [\text{м}^2 \text{сек}/\text{К}]$.

При условии сдвига ветра на границах фронтальной облачной полосы более

2,5 м/сек, оптимальное значение эмпирического коэффициента оказалось равным $k_1 = 1,5 \cdot 10^3 [m^2 \text{сек} / K]$.

Кроме того, данные значения эмпирических коэффициентов являются оптимальными вне зависимости от заблаговременности прогноза (см. таблицу 2), и вне зависимости от типа фронта.

В то же время эмпирический коэффициент при градиенте температуры в формуле (5) k_2 является размерным коэффициентами, причем размерность k_2 - [м/К]. Предположим, что в качестве коэффициента k_2 может быть использован минимальный градиент температуры, при котором синоптики считают, что фронт существует. Тогда

$$k_2 = \left(\frac{8^{\circ}C}{1000км} \right)^{-1}.$$

В заключении стоит отметить, что автором получена формула для расчета скорости роста фронтальной облачности вдоль направления перемещения приземной линии фронта в виде формулы (5). Огромный объем исходного материала позволил провести численные эксперименты по определению успешности расчетов на разных стадиях существования атмосферного фронта. В ходе численных экспериментов по определению значений эмпирических коэффициентов, содержащихся в формуле (5), были выявлены условия, определяющие значения коэффициента модели k_1 .

Проведенный анализ результатов численных экспериментов также показал, что:

- учет притоков тепла и влаги позволяют повысить точность расчета в 1,5 раза, т.е. на 35-50% практически во всех случаях (вне зависимости от типа фронта и времени года, суток);
- учет параметра фронтогенеза повышает точность расчета скорости роста фронтальной облачности вдоль направления перемещения фронта на 17-47% во всех случаях (вне зависимости от типа фронта и времени года и суток);
- учет горизонтального градиента температуры повышает точность расчета скорости роста фронтальной облачности вдоль направления перемещения фронта на 8-12%. Вклад данного параметра в точность так же не зависит от времени суток, времени года и типа фронта.

Таблица 1

Влияние различных значений эмпирического коэффициента k_1 на среднюю относительную ошибку расчета изменения за 3 часа ширины облачной полосы, связанной с теплым фронтом от 1200Z 12.03.2009

Значение величины	Средняя относительная ошибка прогноза при условии	
1,0	0,17624	0,03951
1,5	0,09823	0,01854
2,0	0,04569	0,04892
2,5	0,02158	0,09458
3,0	0,05894	0,13423

Влияние различных значений эмпирического коэффициента k_1 на среднюю относительную ошибку расчета изменения за 3 часа ширины облачной полосы, связанной с холодным фронтом от 1200Z 15.06.2010

Значение величины		Средняя относительная ошибка прогноза при условии	
за 3 часа	1,0	0,18632	0,04001
	1,5	0,08991	0,01774
	2,0	0,04635	0,04466
	2,5	0,02112	0,09162
	3,0	0,05989	0,14561
за 6 часов	1,0	0,25485	0,21897
	1,5	0,23145	0,20984
	2,0	0,22361	0,22245
	2,5	0,20156	0,26871
	3,0	0,21468	0,28462
за 9 часов	1,0	0,17456	0,13269
	1,5	0,16358	0,12412
	2,0	0,15473	0,15047
	2,5	0,13333	0,17369
	3,0	0,13587	0,20141

Литература

1. *Вихрова С.В.* К вопросу о связи фронтогенеза с изменением площади фронтального облачного покрова./ дип. в ВИНТИ – СПб.: Изд. РГГМИ. – 1999. – 10с.
2. *Vikhrova S.V.* Heat and moisture fluxes in the coastal zone [text]/ S.V. Vikhrova// materials of the reports III inter. Workshop. Rational exploration of the costal zone of the northern seas. – Kandalaksha, July 17. – 1999.- SPb.:RSHMU pbl. –pp. 218
3. *Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакин А.Д.* К вопросу об анализе и сверхкраткосрочном прогнозе эволюции атмосферных фронтов./ матер. Итоговой сессии Ученого совета РГГМИ. Тез.док.- СПб.: изд. РГГМИ, 1996. – 75с.
4. *Кузнецов А.Д.* Текущее прогнозирование на основе цифровой обработки изображений. – СПб.: изд. РГГМИ, 1997.- 109-153с.
5. *Ланин Б.Д., Репинская Р.П.* Прогноз влажности, облачности и осадков./ консп.лекц. – Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1982.- с. 18-32.
6. *Шакина Н.П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.:Гидрометиздат, 1985. – 263с.