

С.В. ИВАНОВ, к.г.н.

*Одесский государственный экологический университет / Geophysical Institute,
University of Alaska*

ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР КАК СЛАБОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ НА ЭТАПЕ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ MM5

Исследуются особенности применения цифрового фильтра как слабого ограничения при инициализации численной модели. Такой подход позволяет достичь лучшего динамического баланса в начальных условиях модели между полями различных метеорологических величин. Результаты численных экспериментов показывают, что использование цифрового фильтра обеспечивает оптимальное описание полей на этапе инициализации модели и снижает скорость роста ошибки прогноза при последующем интегрировании.

Ключевые слова: инициализация модели, цифровой фильтр, усвоение данных наблюдений.

Введение. Процесс инициализации является неотъемлемым этапом расчетов в любой сколько-нибудь серьезной численной модели. Понимание необходимости этого этапа в процессе моделирования стало общепринятым с 1951 года [1]. Тогда было установлено, что если *a priori* не накладывать определенные ограничения на начальные условия модели, то это приводит к возбуждению нереальных высокочастотных движений, которые прежде интерпретировались как гравитационные волны. Такое ограничение может быть выражено, например, через независящий от времени баланс между полями массы и скорости.

Инициализация модели выполняется непосредственно перед интегрированием модели. В определенной степени процесс инициализации находится в противоречии с процессом усвоением данных, которое используется для достижения максимальной близости начальных полей модели к данным наблюдений на рассматриваемый момент времени. От условий компромисса между этими двумя этапами моделирования зависит точность численных расчетов и устойчивость процесса счета. Поэтому условие динамического баланса включается в качестве одного из членов в уравнение функции стоимости на этапе усвоении данных.

Важную роль в таком компромиссе играет метод инициализации и его свойства. В относительно простых моделях, как правило, используется наджинг (Nudging), который объединяет в себе обе задачи. Такой подход непрерывно сглаживает поступающие данные наблюдений с заданными пространственными и временными окнами. Однако он не имеет под собой физической основы и непрерывно, в большей или меньшей степени, искажает физику и динамику модельных расчетов.

Физически более обоснованными получаются начальные условия при использовании методов нормальной моды инициализации (НМИ) [2, 3]. Эти методы основаны на удалении всех инерционно-гравитационных мод (линейная НМИ) или предположении постоянства энергии инерционно-гравитационных волн (нелинейная НМИ) [4-6] в ходе интегрирования модели. Однако методы НМИ имеют ряд серьезных ограничений для применения их в моделях по ограниченной территории, в моделях высокого разрешения, и при инициализации полей с мезо- и мелко-масштабными структурами.

В последние годы был предложен еще один подход для инициализации численных моделей, получивший название Цифрового Фильтра (ЦФ) [7-9]. Его суть заключается в том, чтобы контролировать медленное изменение в поведении атмосферных мод через приспособление модельного решения к поступающим наблюдениям на этапе усвоения данных. Такой контроль реализуется с помощью введения функции стоимости, которая определяет и фильтрует активность высокочастотных гравитационных волн.

В данной работе оцениваются преимущества введения ЦФ в систему четырехмерного вариационного усвоения данных модели MM5 с использованием стандартных наземных данных и аэрологического зондирования над Северной Америкой в контексте эксперимента OSSE (Observing System Simulation Experiment).

Материалы и методы исследования: Как известно из теории обработки рядов, фильтрация высокочастотных волн в траектории модели реализуется через дискретную функцию свертки модельного состояния $x(t_k)$ с весовой функцией α_k на каждом шаге t_k временного интервала N . Фильтрованное модельное состояние относится к середине рассматриваемого интервала и определяется как

$$\bar{x}(t_{N/2}) = \sum_{k=0}^N \alpha_k x(t_k)$$

Следует помнить, что веса фильтра должны быть пронормированы на рассматриваемом интервале во избежание изменения среднего значения переменных вдоль траектории модели, т.е.

$$\beta_k = \alpha_k / \sum_{m=-M}^M \alpha_m$$

Функция стоимости цифрового фильтра (ФСЦФ) задается через отклонение фильтрованного состояния атмосферы от соответствующего нефильтрованного

$$J_{DF}(x) = \frac{\lambda}{2} \langle [x(t_{N/2}) - \bar{x}(t_{N/2})], W [x(t_{N/2}) - \bar{x}(t_{N/2})] \rangle$$

где символ $\langle \cdot, \cdot \rangle$ означает скалярное произведение, а λ - параметр приспособления ФСЦФ, который задает величину для включения слабого ограничения (фильтрации). W - диагональная матрица, которая определяет весовые коэффициенты для каждой переменной вектора контроля состояния атмосферы. Такое взвешивание выполняется, главным образом, для нормировки переменных, имеющих различную амплитуду изменчивости, чтобы обеспечить однородность их вклада в ФСЦФ. Подобное нормирование способствует также более быстрой сходимости в процессе минимизации. Кроме того, такая процедура дает возможность включать или исключать ту или иную атмосферную величину при расчете ФСЦФ. На практике, весовые коэффициенты часто задаются на основе матрицы ковариации ошибки полей предшествующего прогноза.

Градиент ФСЦФ может быть выражен в виде

$$\nabla_x J_{DF}(x_0) = \sum \mu_k M^*(t_0, t_k) W [x(t_{N/2}) - \bar{x}(t_{N/2})]$$

где

$$\mu_k = \begin{cases} -\beta_k & \text{при } k \neq N/2 \\ 1 - \beta_k & \text{при } k = N/2 \end{cases}$$

$M^*(t_0, t_k)$ – система сопряженных уравнений в операторной форме.

Интересной особенностью включения цифрового фильтра как слабого ограничения в процесс минимизации является то, что он работает в рекурсивном режиме, хотя сам фильтр является нерекурсивным. Действительно, фильтрованное состояние изменяется на каждой итерации, так как процедура минимизации схемы вариационного усвоения изменяет начальные условия, а, следовательно, и последующий прогноз в пределах окна усвоения данных. Кроме того, в цифровом фильтре при минимизации ФСЦФ используется меняющийся вектор искомого состояния, тогда как в функции стоимости вариационной схемы составляющие части вектора искомого состояния, связанные с наблюдениями и моделью, сохраняются фиксированными.

Недостатком цифрового фильтра как способа инициализации является то обстоятельство, что начальные условия определяются для средней точки окна усвоения, а в предшествующий период состояние считается переходным и неинициализированным. Однако имеется возможность сместить точку инициализации ближе к началу окна усвоения. Это достигается за счет использования более короткого периода фильтрации по сравнению с продолжительностью окна усвоения.

Постановка численных экспериментов. Целью данной работы является исследование особенностей применения цифрового фильтра в качестве слабого ограничения для задач инициализации начального состояния модели в процессе вариационного усвоения данных. В частности, изучались свойства фильтра при различном выборе длины фильтра по сравнению с периодом усвоения данных.

Для исследования особенностей инициализации модели с использованием цифрового фильтра в данной работе был выбран случай циклогенеза над северной частью Тихого океана в период с 9 по 12 декабря 2002 г. (рис.1). В этот период циклон развивался над Алеутскими островами и смещался на континент. Численные расчеты выполнялись на сроки до 72 часов на модели ММ5 с описанием физических процессов в явном виде. Для формирования начальных полей использовался NCEP анализ, стандартные данные наземных и аэрологических наблюдений над районом. Численные эксперименты выполнялись в контексте OSSE.

Первоначально, воспроизводились “истинные” поля атмосферы на основе интегрирования модели на сетке высокого разрешения. В дальнейшем, эти поля использовались для оценки эффективности различных схем усвоения данных. Такой подход стал достаточно распространенным [10], так как получить реальный анализ с высоким пространственным и временным разрешением на сегодняшний день не представляется возможным. Затем выполнялись численные эксперименты на грубой сетке с разрешением, примерно соответствующим разрешению сети наблюдений для того, чтобы минимизировать ошибку репрезентативности. При этом использовались два способа вариационного усвоения данных, с цифровым фильтром как слабое ограничение, и без фильтра как сильное ограничение. Было выполнено большое число экспериментов по исследованию чувствительности результатов к параметрам

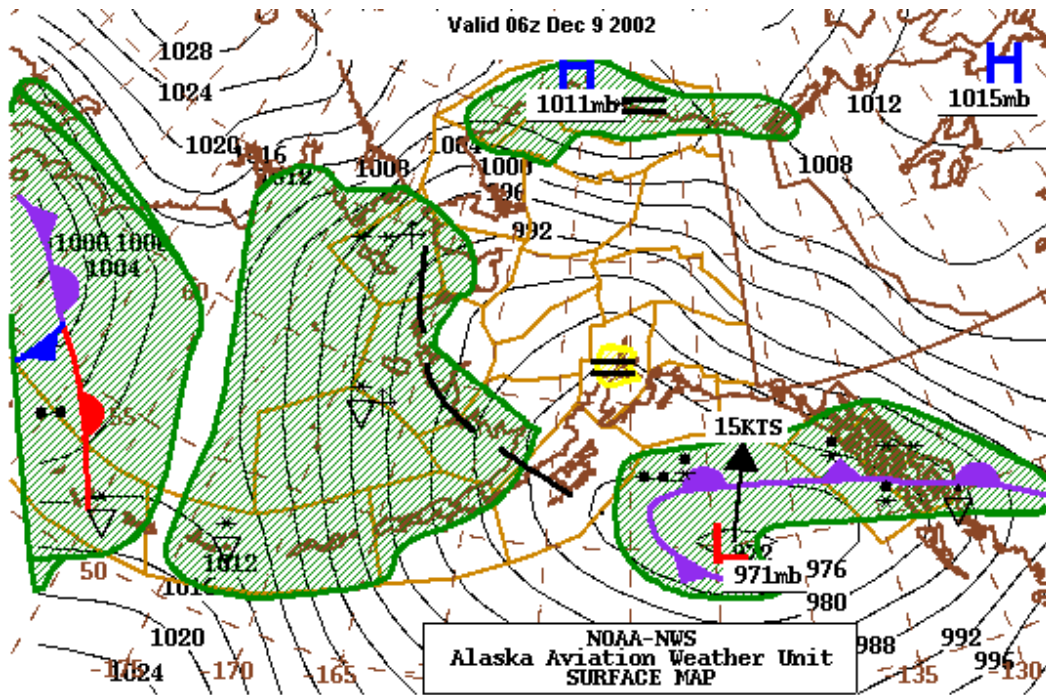


Рис.1. Область исследования и синоптическая ситуация в период численного эксперимента.

цифрового фильтра и вариационной схемы. В настоящей работе приводятся ключевые результаты основных экспериментов.

Результаты численных экспериментов. На рис.2 показана изменчивость во времени давления на нижнем уровне модели в узле сетки, находящейся в районе архипелага Александра, через который проходит центр циклона (см. рис.1). Как видно из рисунка, “истинное” состояние атмосферы плавно эволюционирует во времени. Усвоение данных с жестким ограничением (без цифрового фильтра) порождает возмущения с характерным периодом порядка 3 часов (периодом поступления данных наблюдений в синоптические сроки). Введение цифрового фильтра в процедуру усвоения данных в значительной мере удаляет эти возмущения, но при этом приводит к некоторому отклонению от “истинной” траектории. Величина такого отклонения от узла к узлу меняется, достигая в некоторых точках значений в 2 гПа, хотя характер поведения кривых достаточно близок.

На рис.3 представлено поведение нормированной ФС в зависимости от числа итераций при использовании ЦФ и без него. После 60 итераций ФСЦФ имеет примерно на два порядка меньшее значение. Так можно приблизительно оценить вклад высокочастотной волновой активности, и в последующем учесть это через ошибку ковариации в поле прогноза.

Применение ЦФ на этапе инициализации позволяет получить еще одно важное преимущество. Как известно, в численных моделях атмосферы существует проблема отражения гравитационных волн на верхней границе атмосферы. Особенно остро эта проблема стоит для высоких широт. Поэтому использование вариационного усвоения в классическом виде (без использования ЦФ) может приводить иногда и к ухудшению результатов за счет возбуждения и усиления высокочастотных гравитационных волн в верхних слоях. Проведенные численные эксперименты показали, что применение ЦФ снижает остроту проблемы верхней границы за счет фильтрации высокочастотных

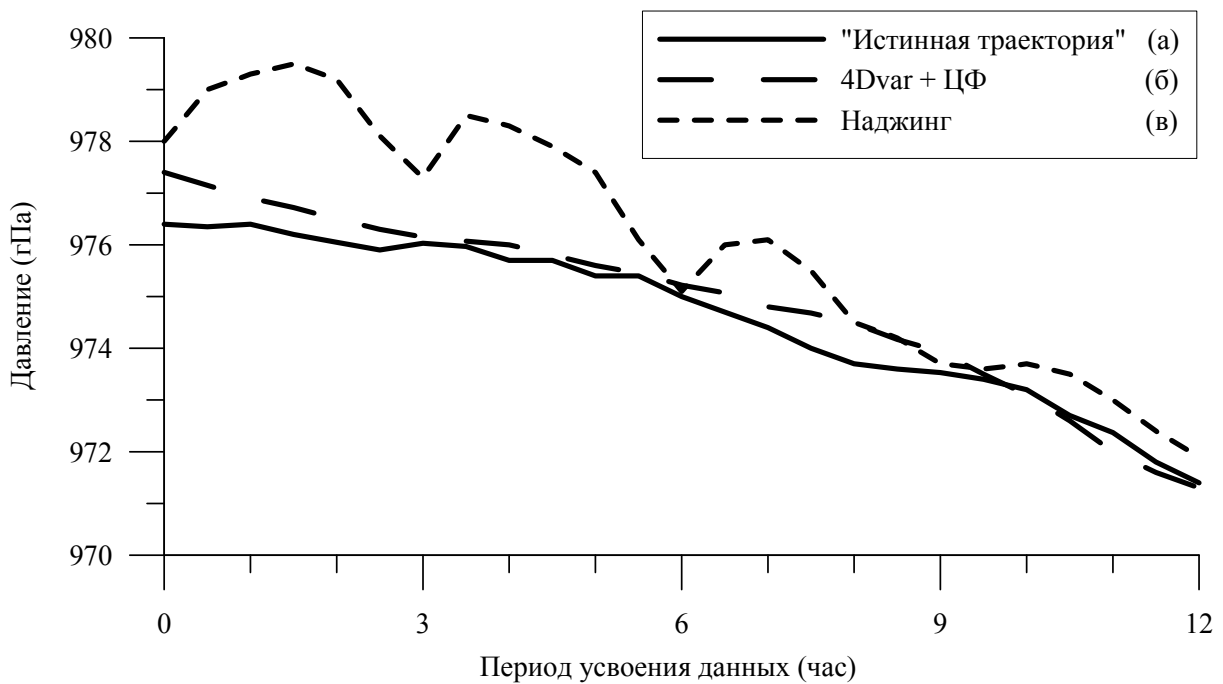


Рис.2. Изменение во времени давления на нижнем модельном уровне в области прохождения центра циклона. (а) “истинное состояние атмосферы”; (б) в модели с вариационным усвоением данных и цифровым фильтром; (в) в модели с наджингом.

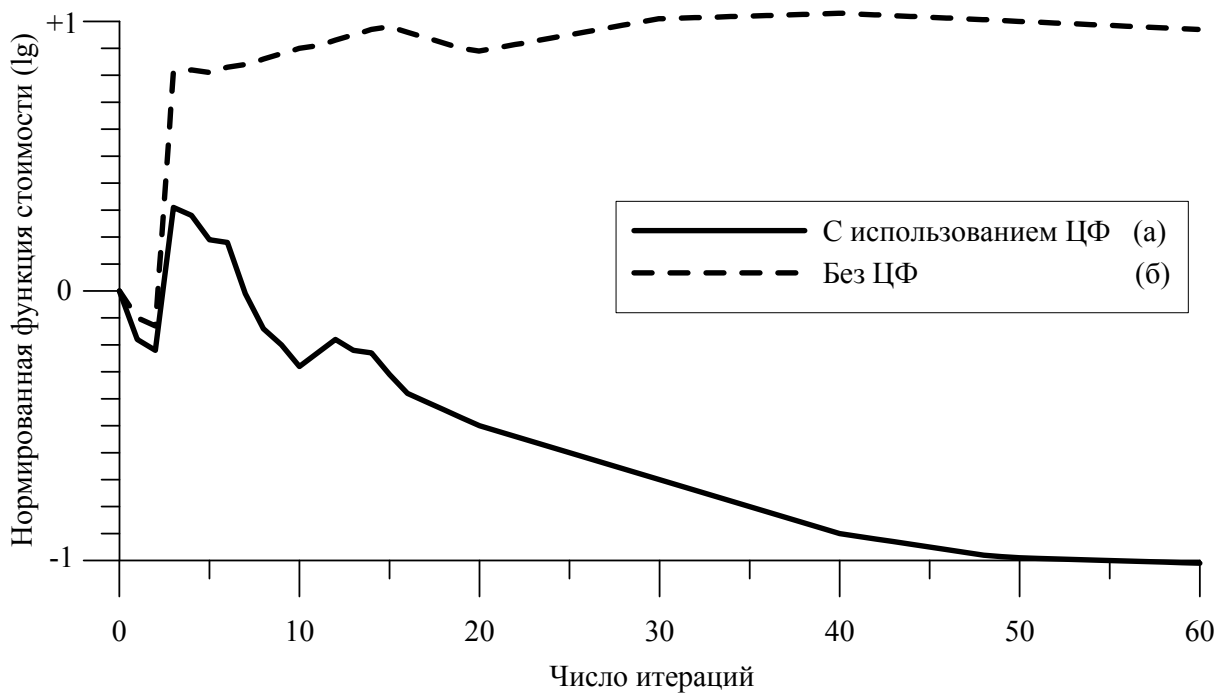


Рис.3. Нормированная функция стоимости при использовании цифрового фильтра на периоде усвоения данных (а) и без цифрового фильтра (б) в зависимости от числа итераций.

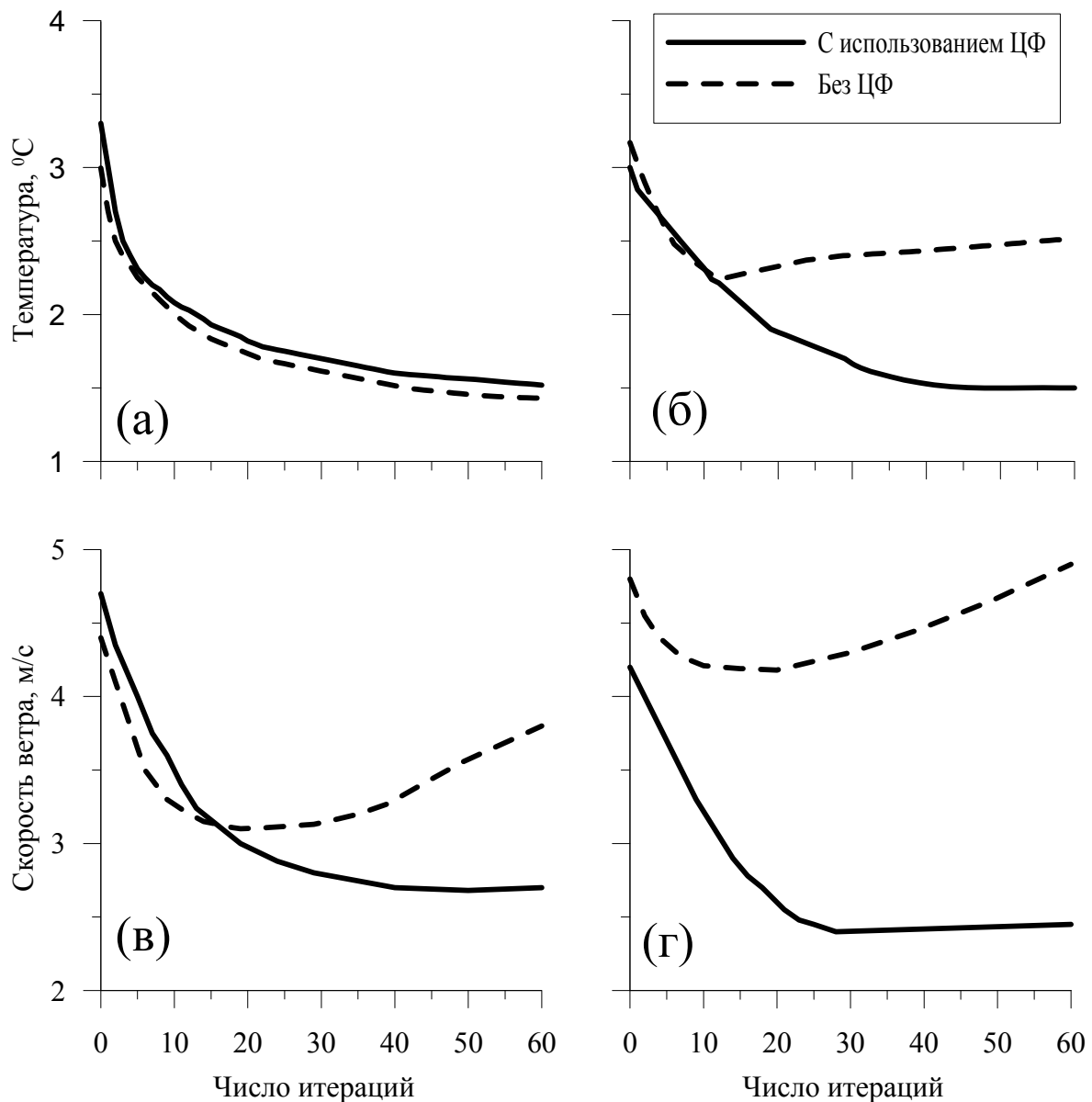


Рис.4. Среднеквадратичное отклонение инициализируемых полей температуры (а и б) и скорости ветра (в и г) от данных наблюдений (а и в) и модельных полей (б и г) при использовании цифрового фильтра на периоде усвоения данных (сплошные кривые) и без цифрового фильтра (пунктирные кривые).

гравитационных волн на верхних уровнях и подавления их вертикального распространения на средних и нижних уровнях.

На рис.4 показана такая же зависимость от числа итераций для среднеквадратичного отклонения (СКО) в инициализируемых полях температуры и ветра. Эти результаты получены как в модельном пространстве, так и в пространстве наблюдений. Из рис.4а видно, что применение ЦФ не дает значительного эффекта при расчете СКО в поле температуры относительно данных наблюдений. В тоже время, во всех остальных случаях, включая и поле температуры в модельном пространстве, при использовании ЦФ, СКО становится меньше уже после примерно десяти итерации. Такую особенность процедуры усвоения и инициализации можно объяснить

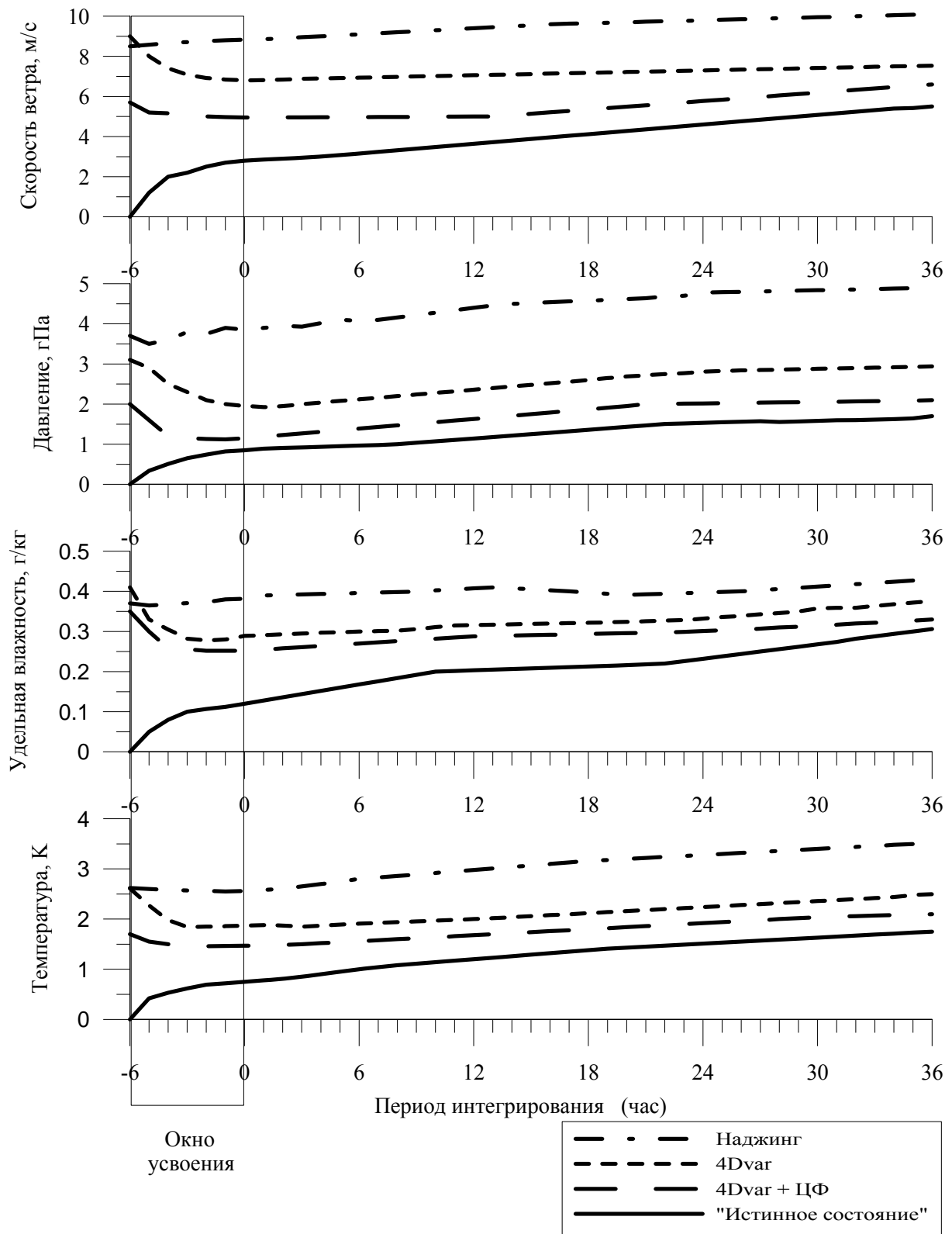


Рис.5. Скорость роста ошибки краткосрочного прогноза различных метеорологических величин при использовании в качестве схемы усвоения данных наджинга, вариационного усвоения, и вариационного усвоения с цифровым фильтром. Выделено также 6-часовое окно усвоения данных.

следующим обстоятельством. Процедура усвоения без ЦФ формирует поле температуры с учетом данных наблюдений температуры у поверхности, но без должного учета соотношений между полями температуры, влажности и давления. Это, в свою очередь, порождает усиление динамического дисбаланса с увеличением числа итераций. Использование ЦФ, с другой стороны, способствует взаимному приспособлению полей массы и ветра.

На рис.5 приведены кривые роста ошибки краткосрочного прогноза основных метеорологических переменных на отрезке времени до 36 часов. По нему отчетливо видна эффективность использования ЦФ как на периоде усвоения, так и при последующем интегрировании. Причина этого может быть объяснена следующим образом. Вариационное усвоение данных в его первоначальном виде формирует начальные условия, которые не гарантируют наилучшее описание состояния атмосферы на данный момент времени. На самом деле, оно создает оптимальные поля, которые одновременно наиболее близки, в смысле среднеквадратической ошибки, к полям модели и данным наблюдений. Близость таких оптимальных полей к реальным в значительной степени определяется как точностью данных наблюдений и их покрытием, так и степенью совершенства модели. Имеющиеся нарушения динамического баланса в таких оптимальных в значении среднеквадратичных отклонений полях могут эффективно контролироваться слабым ограничением в виде ЦФ, используемым на периоде усвоения. В этом случае модельное состояние атмосферы становится динамически более обоснованным на периоде усвоения, а использование данных наблюдений более эффективным, что способствует повышению качества прогноза.

Выводы. Результаты численных экспериментов с моделью MM5 показали, что использование слабого ограничения в форме цифрового фильтра на этапе усвоения данных способствует формированию более динамически сбалансированных начальных условий. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению скорости роста ошибки численного прогноза.

Все расчеты были выполнены на компьютере SGI Tezro Геофизического института университета Аляска в рамках проекта "4Dvar in MM5 for high latitude forecasting" по заказу Air Forces Weather Service.

Список литературы

1. *Hinkelman K.* Der Mechanismus des meteorologischen Lames // *Tellus*. 1951. - v.3. - pp.285-296.
2. *Dickinson R.E., Williamson D.L.* Free oscillations of a discrete stratified fluid with application to numerical weather prediction // *J.Atmos.Sci.* 1972. – v.78. – pp.623-640.
3. *Williamson D.L.* Normal mode initialization procedure applied to forecasts with the global shallow water equations // *Mon.Wea.Rev.* 1976. – v.104. – pp.195-206.
4. *Baer F., Tribbia J.* On complete filtering of gravity modes through nonlinear initialization // *Mon.Wea.Rev.* 1977. – v.105. – pp.1536-1539.
5. *Daley R.* Variational nonlinear normal mode initialization // *Tellus*. 1978. – v.30. – pp.201-218.
6. *Machenhauer B.* On the dynamics of gravity oscillations in a shallow water model, with application to normal mode initialization // *Contrib.Atmos.Phys.* 1977. – v.50. – pp.253-271.

7. *Huang X.-Y., Lynch P.* Diabatic digital-filtering initialization: Application to the HIRLAM model // *Mon.Wea.Rev.* 1993. – v.121. – pp.589 – 603.
8. *Polavarapu S., Tanguay M., Fillion L.* Four dimensional variational data assimilation with digital filter initialization // *Mon.Wea.Rev.* 2000. – v.128. – pp.2491-2510.
9. *Gauthier P., Therpaut J.-N.* Impact of the digital filter as a weak constraint in the preoperational 4D-var assimilation system of Meteo-France // *Mon.Wea.Rev.* 2001. – v.129. – pp.2089-2102.
10. *Desroziers G., Ivanov S.* Diagnosis and adaptive tuning of observation-error parameters in a variational assimilation // *Q.J.Royal.Meteorol.Soc.* 2001. – v.127. – pp.1433-1452.

The digital filter as a weak constraint in an initialization procedure of the MM5 numerical model. Ivanov S.

The weak constraint formulation of a digital filter implemented in the initialization step of the mm5 model is considered. This approach allows us to achieve the better dynamic balance between mass and wind fields in the initial conditions of the model. The results of numerical simulations show that the digital filter enables the optimal fitting of the meteorological fields during initialization as well as reduces a growth rate of forecast errors throughout a consequent integration.

Keywords: *model initialization, digital filter, data assimilation.*

Цифровий фільтр як слабка обмеженість на етапі ініціалізації чисельної моделі MM5. Іванов С.В.

Досліджуються особливості застосування цифрового фільтру як слабкої обмеженості при ініціалізації чисельної моделі. Такий підхід дозволяє досягнути кращого динамічного балансу в початкових умовах моделі між полями різних метеорологічних величин. Результати чисельних експериментів показують, що використання цифрового фільтру забезпечує оптимальний опис полів на етапі ініціалізації моделі і зменшує швидкість росту похибки прогнозу при подальшому інтегруванні.

Ключові слова: *ініціалізація моделі, цифровий фільтр, засвоєння даних спостережень.*