

УДК 551.576:551.551.3

Д.В. Пишняк, асп., **Г.П. Ивус**, к.геогр.н., проф.,
Одесский государственный экологический университет

В.М. Шпиг, к.геогр.н., **И.В. Будақ**

Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт

ОЦЕНКА ПЕРЕХОДОВ ЭНЕРГИИ В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Для исследования пространственной структуры преобразований энергии атмосферы могут быть использованы частные производные по времени от некоторых метеорологических величин. Один из возможных способов расчета полей частных производных базируется на применении адвекции, полученной в полу-Лагранжевом подходе. В статье приведено описание принципа расчетного алгоритма, представлены примеры использования частной производной для задач исследования переходов энергии атмосферы на основе результатов прогноза модели WRF, сделаны заключения о влиянии исходного разрешения данных по времени на результаты расчетов. **Ключевые слова:** полу-Лагранжевая адвекция, частная производная, межвидовые преобразования энергии.*

Современные комплексные численные модели атмосферы открывают новые возможности для физико-статистических и теоретических исследований атмосферных явлений. Однако, чтобы использовать преимущества результатов моделирования, необходимы соответствующие методы обработки данных и новые подходы к постановке исследований. Поскольку в ряде случаев отслеживание преобразований параметров непосредственно в модели является технологически неудобным или попросту невозможным, целесообразно создание универсальных алгоритмов, использующих для расчета стандартную прогностическую информацию современных гидродинамических моделей. В качестве такого алгоритма для расчета полей частной производной предлагается использовать адвекцию, рассчитанную в полу-Лагранжевом подходе (далее полу-Лагранжевая адвекция) [1]. Достоинство способа заключается в меньшей требовательности к временному разрешению данных, что технологически важно при обработке результатов моделирования. Физическая же ценность полей частной производной по времени состоит в отображении источников и стоков массы и энергии, получении количественной оценки их интенсивности. Рассматриваемый универсальный подход может быть полезен при исследовании преобразований энергии атмосферы, в частности, применительно к мезомасштабным атмосферным процессам.

Целью работы является: 1) обоснование метода расчета частной производной по времени на основе полу-Лагранжевой адвекции; 2) проверка применимости метода для исследования переходов энергии в атмосфере и эволюции метеорологических объектов, на основе результатов моделирования состояния атмосферы; 3) определение характера влияния временного шага данных на свойства погрешности в предложенной методике.

Методы исследования. Полу-Лагранжевый подход представляет собой комбинацию Эйлера и Лагранжевых способов описания сплошной среды и предполагает расчет параметров в движущихся частицах среды, траектории которых начинаются либо заканчиваются (как в нашем случае) в узлах регулярной сетки. В ряде работ [1,2,3], отмечается, что полу-Лагранжевая схема проявляет большую вычислительную устойчивость и меньше зависит от шага по времени, поэтому, при увеличении последнего является предпочтительной перед схемой Эйлера. Полу-Лагранжевая схема реализуется в два этапа: 1) расчет функции тока (траектории частицы) и 2) интерполяция величины в точку между узлами сетки.

Как говорилось во введении, полу-Лагранжевую схему можно и целесообразно использовать для определения адвекции величины в узле сетки, когда путь, пройденный частицей за интервал временной дискретизации, значительно (в несколько раз) превышает размер пространственного шага сетки. Принцип работы такой схемы в нескольких

вариантах реализации наглядно представлен на рис.1. При известном направлении и скорости переноса определяются координаты точки адвекции (x_A, y_A) , из которой воздушная масса придет в заданный узел сетки с координатами x, y . Наиболее простым является расчет прямолинейной траектории по данным о ветре в исходный момент времени (рис 1а). Однако при большой изменчивости поля такое упрощение приводит к значительной погрешности определения местоположения точки адвекции, а следовательно и адвективной величины. Несколько повысить точность расчета можно используя среднюю скорость ветра в рассматриваемом узле за исходный и предшествующий отсчеты по времени (рис 1б), но наиболее надежное определение точки адвекции достигается аппроксимацией линии тока. Этот последний вариант реализации использован в нашем исследовании. Для аппроксимации линии тока применялась дополнительная поддискретизация по времени, реализованная в расчетном алгоритме таким образом, чтоб максимальная длина прямолинейных участков траектории не превышала размера шага сетки (рис 1в). На каждом отсчете дополнительной поддискретизации, путем четырехмерной линейной интерполяции между ближайшими восемью узлами сетки и между основными отсчетами по времени, выполняется переучет составляющих скорости движения частицы u_i, v_i . Для упрощения понимания сути метода подчеркнем его аналогию с методом построения траектории, применяемым в синоптической практике для расчета адвекции.

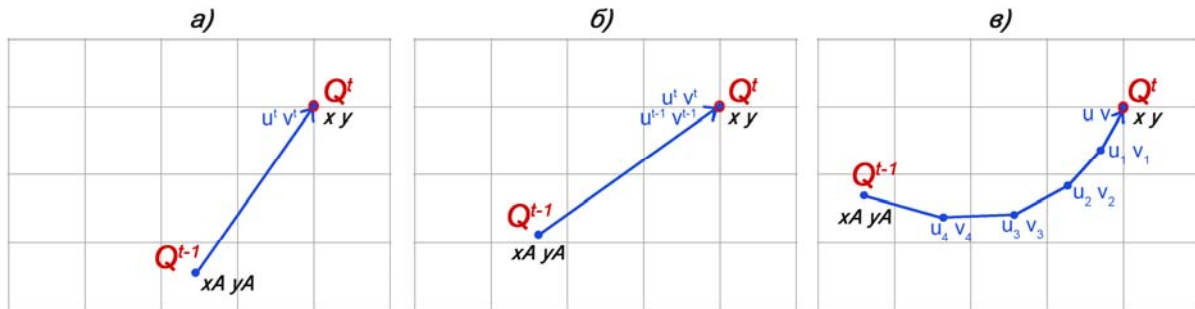


Рис 1. – Примеры возможных траекторий движения частицы для различных схем расчета адвекции в полу-Лагранжевом подходе.

Имея текущее значение величины в рассматриваемом узле сетки $Q_{x,y}^t$ и определив описанным способом адвективное значение Q_{x_A,y_A}^{t-1} , удобно вычислить частную (локальную) производную по времени, вычитая из первого второе. Следует помнить, что значение производной также будет содержать погрешность ΔQ , вызванную междуузловой интерполяцией данных и неточностью определения положения самой точки адвекции

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = Q_{x,y}^t - Q_{x_A,y_A}^{t-1} - \Delta Q. \quad (1)$$

Кроме того, поскольку данная схема является однонаправленной, рассчитанные значения производной будут смещены в пространстве на половину длины траектории в направлении по потоку.

Предприняв описанные меры повышения точности определения точки адвекции, запишем расчетную формулу, пренебрегая вкладом последнего слагаемого

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx Q_{x,y}^t - Q_{x_A,y_A}^{t-1}. \quad (2)$$

Исходные данные. Рассмотрим несколько примеров полей частных производных и проведем их анализ с метеорологической точки зрения для одного из случаев прохождения циклона над районом Восточной Европы 14 октября 2009 г., воссозданного при помощи региональной модели атмосферы WRF. Исходными данными служат трехмерные поля метеорологических величин, полученные на выходе указанной модели в узлах регулярной

прямоугольной сетки с шагом 30 км по горизонтали, переменным шагом по вертикали на 27 уровнях и разрешением по времени в один час. Для дополнительного исследования влияния временной дискретизации на точность расчетов, использован другой набор экспериментальных данных, полученных на выходе модели MM5 над территорией Западной Европы, со следующими характеристиками: горизонтальное разрешение – 9 км, вертикальное – 48 уровней и временное – 5 мин.

Обратим внимание, что в южной части расчетного домена WRF, приведенного на рис. 2, расположены многочисленные горные системы, привносящие значительную неоднородность в результаты расчетов. Для уменьшения влияния подстилающей поверхности будем рассматривать уровень на высоте 3 км, примерно соответствующий абсолютной топографии изобарической поверхности 700 гПа (AT-700) и ограничимся одним субъективно выбранным моментом времени с наиболее представительной синоптической ситуацией – 04:00 UTC, 14 октября 2009 г. (рис. 2).

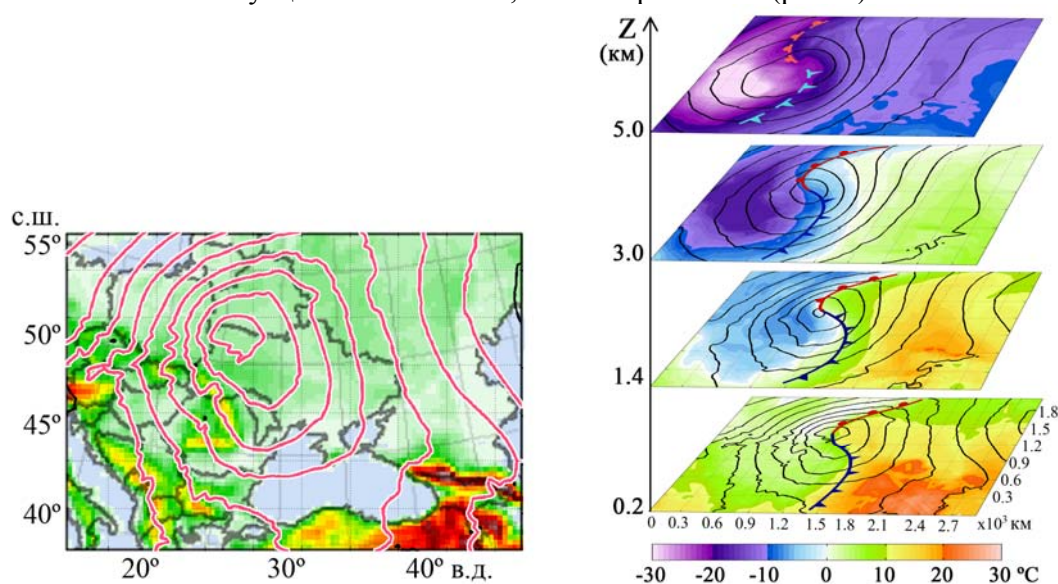
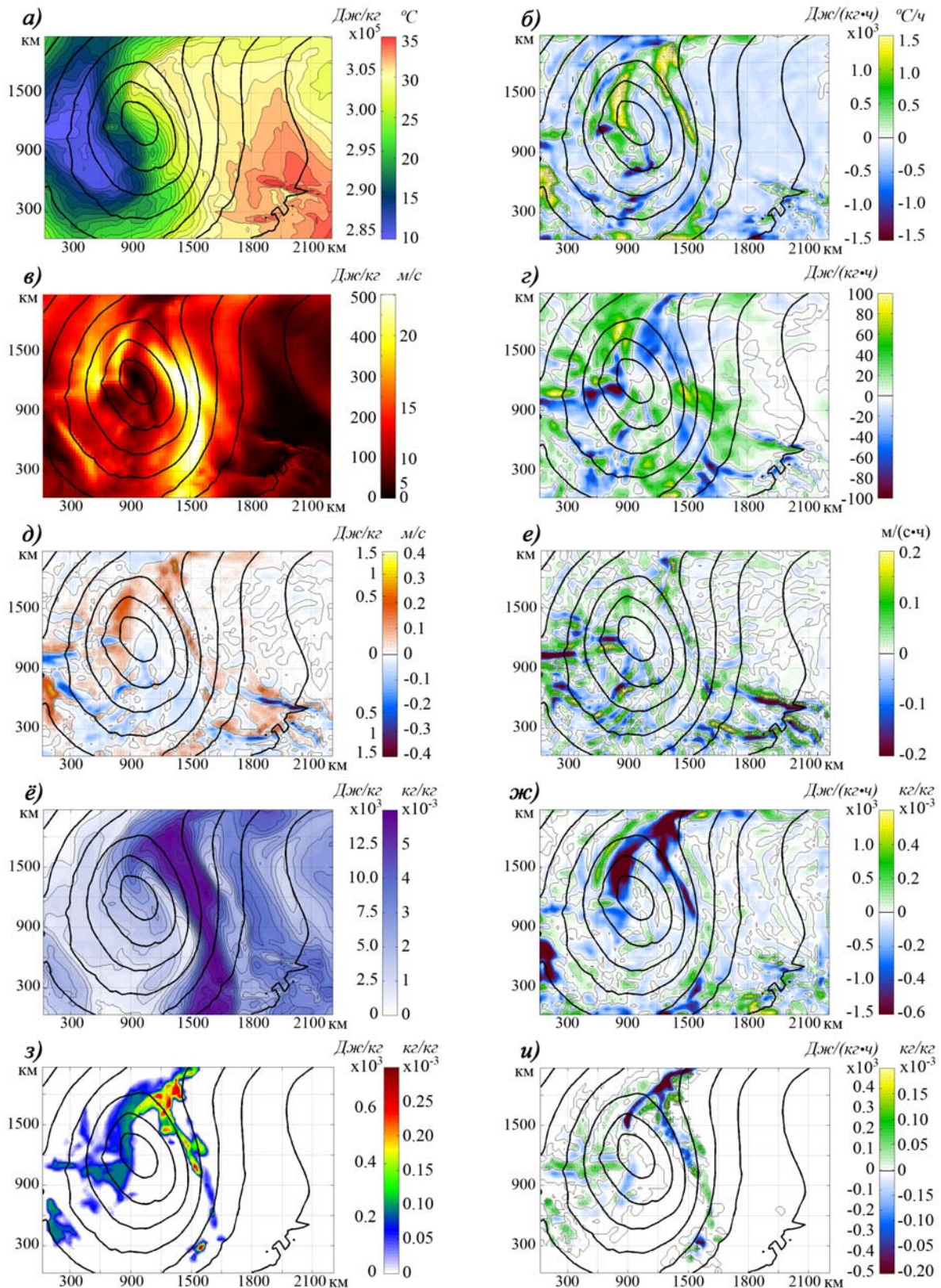


Рис. 2 – Район моделирования и горизонтальные разрезы термобарического поля над ним 14 октября 2009 г. в 04:00 UTC.

Постановка и результаты исследования. Расчет локальной производной произведен по формуле (2), в соответствии с которой адвективное значение рассчитано в полу-Лагранжевом подходе с учетом кривизны траектории путем введения дополнительной поддискретизации по времени (схема на рис.1 в). При выходе траектории частицы за границу расчетной области используется последнее действительное значение параметра на границе области.

На рис. 3 в левой колонке (а, в, д, ё, з) представлены исходные поля метеорологических величин, характеризующие запасы различных видов энергии в атмосфере. Связь единиц измерений показана через двойные шкалы. С правой стороны рис.3 (б, г, е, ж, и), приведены соответствующие поля частных производных по времени, отражающие источники и стоки энергии соответствующего вида, т.е. области межвидовых ее переходов. Для наглядности производные представлены в размерности относительно часа, а не секунды, как принято в системе СИ. В дополнение к анализу, на рис. 4 приведено поле осадков у поверхности земли, выпавших за интервал дискретизации данных (один час), а на рис. 5 – составляющая агеострофических отклонений скорости ветра на высоте 3 км. Уточним, что ось, на которую производилась проекция вектора ветра для получения данной составляющей, направлена перпендикулярно изобаре в сторону увеличения давления (от центра циклона).



а), б) – внутренняя энергия, в), г) – кинетическая энергия, д), е) – вертикальная составляющая скорости ветра, ё), ж) – скрытая тепловая энергия конденсации пара, з), и) – скрытая тепловая энергия водности облаков

Рис. 3 – Исходные поля метеовеличин (слева) и соответствующие поля частных производных по времени (справа) рассчитанные на высоте 3 км, за интервал времени в один час.

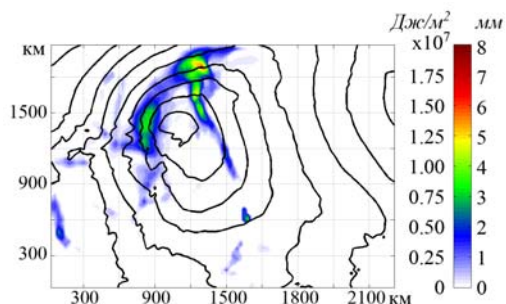


Рис. 4 – Количество осадков за один час.

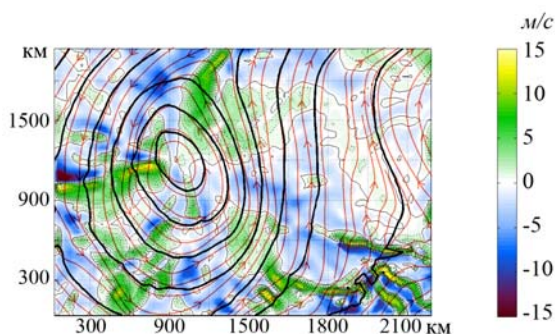


Рис. 5 – Агеострофическая составляющая скорости ветра.

Рассмотрим потенциальную температуру (рис.3а). Ее пространственное распределение типично для циклона на стадии углубления – широкий гребень тепла, соответствующий теплому сектору, очаг холода в тылу циклона и хорошо выраженные фронтальные зоны с повышенными градиентами температуры. Являясь адиабатически консервативной величиной, потенциальная температура позволяет выявить неадиабатические источники и стоки тепловой энергии. Ее частная производная по времени (рис.3б) в невозмущенной воздушной массе теплого сектора циклона, как, в общем, и в тылу циклона, имеет преобладающий отрицательный знак, указывающий на медленное постепенное выхолаживание атмосферы, отражая процесс потери тепла за счет длинноволнового излучения в космическое пространство. В то же время присутствуют мощные очаги интенсивного нагрева атмосферы и несколько менее интенсивные компактные очаги ее охлаждения. Принимая во внимание соответствие их местоположения зонам осадков (рис.4) и облачности (рис.3з), становится понятным, что они связаны с фазовыми переходами воды в атмосфере. При этом отдельные объемы воздуха в циклоне претерпевают нагревание до 2 °С в час. Прямой тепловой поток от земной поверхности в данное время года и при рассматриваемой ситуации не является значимым и не обнаруживается даже на нижних уровнях.

Частная производная поля кинетической энергии ветра (рис.3г) позволяет выявить зоны ускорения и торможения воздушных потоков. Здесь прослеживается закономерность, заключающаяся в том, что основной несущий поток, видимый на рис.3в и связанный с высотной фронтальной зоной, ускоряется вдоль холодного фронта и замедляется на теплом фронте. Она подтверждается и на серии подобных экспериментов для развитых циклонов, но не приведенных в этой работе. Перед теплым фронтом и в тылу циклона, как правило, также преобладает ускорение потока. При этом поле всегда содержит значительные мезомасштабные флуктуации, отчасти обусловленные взаимодействием потока с рельефом местности. Сопоставляя поле производной кинетической энергии с составляющей агеострофических отклонений (рис.5), обнаруживаем хорошее согласование этих полей, рассчитанных независимыми способами. Таким образом, подтверждается правомерность использования по сути *адвекции скорости ветра* для расчета ее же частной производной, а сами значения этой производной на данном масштабе определяются, главным образом, переходами кинетической энергии потока и потенциальной энергии барического градиента в пределах геострофического баланса.

Вертикальные воздушные токи, как видно из рис.3д, связаны с атмосферными фронтами циклона и неровностями подстилающей поверхности. Фронтальным разделам соответствует преобладающее восхождение воздуха, горным системам – парные полосы разнонаправленных вертикальных движений. Частная производная вертикальной скорости (рис.3е) заметно чувствительнее к влиянию рельефа, чем к термодинамической неустойчивости. Вертикальные ускорения, спровоцированные собственно циклоном, оказываются почти на порядок меньше тех, что вызваны динамическим фактором обтекания горных массивов даже на рассматриваемой высоте в 3 км. К сожалению, по этой

причине фронтальные возмущения плохо прослеживаются, будучи замаскированными влиянием рельефа. Данная характеристика очень важна, так как теоретически должна быть связана с переходом доступной потенциальной энергии (в том числе потенциальной энергии конвективной неустойчивости) в кинетическую.

На рис.3ё видно, что фронтальный раздел в целом обладает большим запасом влаги и, соответственно, большим запасом скрытой тепловой энергии, сосредоточенной в широкой полосе вдоль фронта. Однако значимые изменения ее концентрации происходят лишь на отдельных небольших участках фронтальной зоны, где этому способствуют циркуляционные условия (рис.3ж). Пространственное распределение частной производной массовой доли водяного пара имеет много общего с распределением производной потенциальной температуры и осадков. Отрицательные значения указывают на уменьшение влагозапаса воздушной массы за счет конденсации или сублимации пара, что сопровождается выделением скрытого тепла в атмосферу. Положительные значения соответствуют обратному процессу испарения. Данная производная является практически прямой характеристикой переходов скрытой тепловой энергии, допуская лишь малую погрешность, связанную с известной неопределенностью фазового состояния облаков и осадков в атмосфере.

Облачный покров на высоте 3 км в рассматриваемой ситуации не очень обширен, располагается узкими полосами вдоль фронтов и в тылу циклона (рис.3з). Частная производная показывает бессистемное распределение изменения водности облаков со временем за счет конденсации и испарения, а также коагуляцию в осадки, за исключением участка теплого фронта (рис.3и). На этом участке прослеживается характерное образование облачности и прирост ее водности со стороны теплого сектора циклона и диссипация покрова облаков со стороны холодной воздушной массы. Производная характеризует вклад облачности в переходы скрытого тепла конденсации.

Рассмотренные выше примеры показывают, как при помощи единственного алгоритма расчета частных производных можно качественно и количественно оценить переходы различных видов энергии атмосферы, сохраняя информацию о пространственной структуре полей и, в зависимости от исходных данных, подразделение на процессы. Но остается открытым вопрос о точности самого метода полу-Лагранжевой адвекции применительно к расчету частной производной по времени, о чем уже говорилось выше. В некоторых работах этому вопросу также уделено внимание [2,3], однако нас интересует главным образом практические аспекты поведения погрешностей, которые могут иметь место при работе с реальными метеорологическими данными имеющегося пространственно-временного разрешения. Если же влияние межузловой интерполяции в принципе предсказуемо и неизменно, то, собственно, определение точки адвекции оказывается зависимо от дискретности данных о ветре по пространству и времени. Чтобы получить наглядное представление о влиянии такой зависимости, проведем эксперимент, производя расчеты по исходным данным с различной временной дискретностью от 5 до 150 мин. Для этой цели использованы результаты моделирования атмосферы в модели MM5, проведенного для случая прохождения холодного фронта над Западной и Центральной Европой.

На рис.6 приведены некоторые показательные результаты этого эксперимента. Поля частной производной внутренней и кинетической энергии размещены в порядке возрастания временной дискретизации исходных данных ($dt = 5, 20, 50$ и 150 мин.) слева направо. Во всех полях производных внутренней энергии (рис.6а) положению фронта соответствует широкая полоса преобладающих положительных значений, пересекающая район в меридиональном направлении. В первом случае за промежуток времени в 5 мин. при скорости воздушного потока до 30 м/с воздушная частица успевает преодолеть расстояние, соизмеримое с шагом сетки. Здесь проявляются все наиболее мелкие подробности данных, включая вычислительный шум от обратного влияния вложенной сетки (рис.6а, в центре первого поля). При дискретности по времени в 20 мин. вклад шума

уже не прослеживается, тогда как все мезомасштабные особенности структуры фронта все еще сохраняются. При $dt = 50$ мин экстремумы возмущений несколько сглаживаются, местами появляются периодические пространственные колебания величин, возможно, связанные с гравитационными волнами.

В полях производной кинетической энергии (рис.6б), полученных по данным с разрешением в 5 и 20 мин., хорошо видны гравитационные волны, лишь немного различающиеся своей амплитудой в зависимости от dt . Однако, при интервале дискретности в 50 мин исходная структура этих колебаний практически полностью исчезает. Вместо нее, как и в случае с внутренней энергией, местами проявляются слабо заметные периодические неоднородности с другим расположением и периодом колебаний. В этом случае расчетный алгоритм проявляет себя как полосовой фильтр, выделяя колебания, пространственный полупериод которых совпадает с длиной траектории частицы.

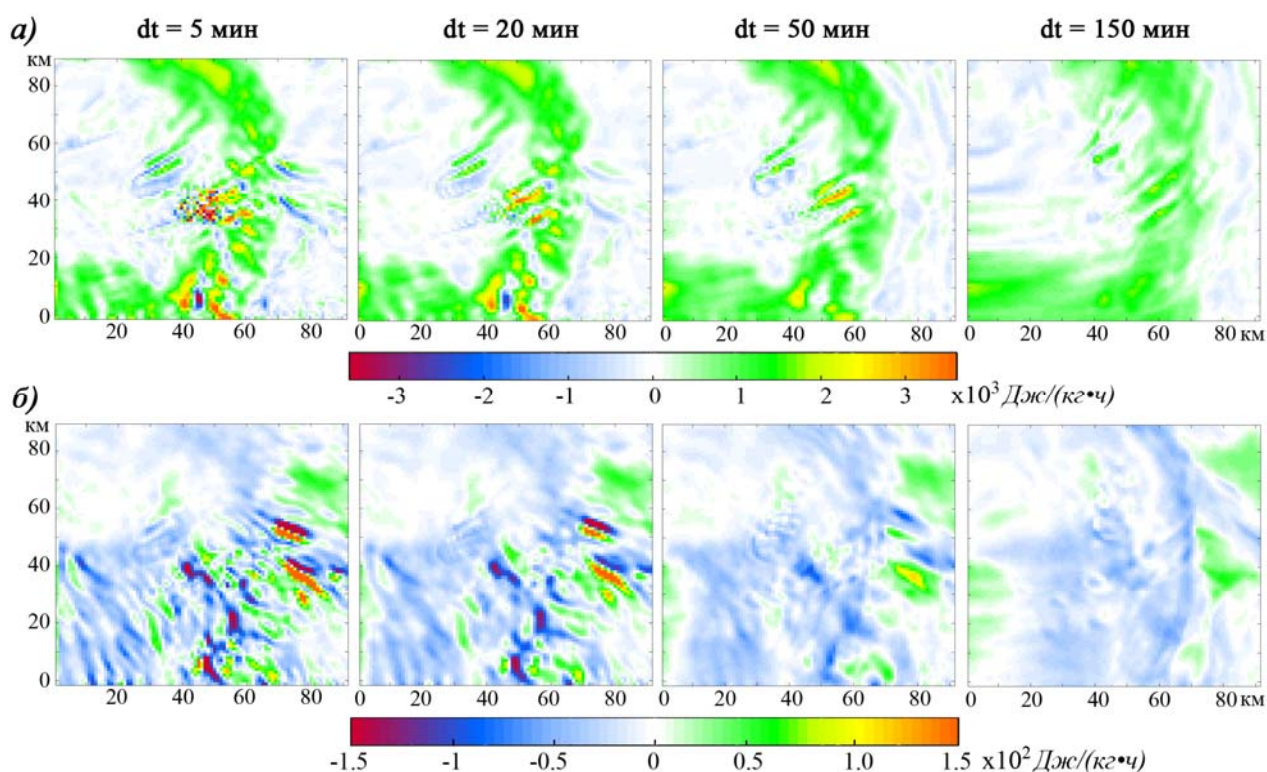


Рис. 6 – Поля частной производной внутренней (а) и кинетической (б) энергий, рассчитанные по исходным данным с различной дискретностью по времени.

Использование данных с дискретностью в 150 мин. приводит к значительному искажению или «смазыванию» мезоструктуры фронта. Так же заметно значительное смещение поля вдоль по потоку на восток (вправо), вследствие большой протяженности траекторий частиц, составляющей теперь 25-30 узлов сетки. Обратим внимание на производную кинетической энергии, поле которой за счет большой степени сглаживания наконец-то обнаружило свою крупномасштабную структуру, ранее сильно замаскированную большими амплитудами гравитационных волн. Вследствие этого проявились полоса торможения, связанная с линией фронта, и зоны ускорения потока перед ней. Конечно, эффект сглаживания не может быть отнесен к достоинству метода, поскольку в нем изначально преследуются иные цели, но полученный результат является физически обоснованным и показательным даже при использовании методики на предельно грубом временном разрешении исходных данных.

Выводы. Проведенные расчеты показывают, что поля частной производной применимы и являются показательными для энергетического анализа как мезомасштабных атмосферных возмущений, так и процессов крупного масштаба. Один из возможных способов расчета полей частных производных базируется на применении адвекции, полученной в полу-Лагранжевом подходе. Преимущество описанного подхода заключается в возможности его использования даже при относительно низком разрешении по времени, что, из соображений удобства и эргономичности, присуще данным, получаемым на выходе современных атмосферных моделей.

Реализованный метод позволяет как прямыми, так и косвенными способами отслеживать переходы различных видов энергий атмосферы, сохраняя информацию о пространственной структуре процессов в пределах исходного разрешения. В зависимости от имеющихся в наличии исходных данных, можно исследовать деление на дополнительные энергетические составляющие, ответственные за более конкретные процессы, например, такие как формирование облаков, осадков и т.п.

К недостатку метода следует отнести сложную зависимость результатов от исходного разрешения по времени. С увеличением временной дискретизации теряется четкость отображения мелких деталей, проявляются резонансные пространственные колебания, привносится смещение местоположения источников/стоков. Однако даже на предельно большой дискретизации сохраняется физическая обоснованность крупномасштабной структуры полей. Поэтому, по результатам проделанной работы приходим к заключению, что предложенный алгоритм расчета частной производной, с используемой в основе полу-Лагранжевой адвекцией, может рассматриваться как практический инструмент для проведения энергетического анализа атмосферных процессов по результатам моделирования. В дальнейшем, при помощи разработанного алгоритма, планируется проведение подробных исследований термодинамической структуры фронтов по расширенному объему исходной информации.

За постановку и проведение эксперимента с мезомасштабной моделью атмосферы MM5, обработку и предоставление данных, приносим благодарность к.геогр.н. Иванову Сергею Васильевичу.

Список литературы

1. *Ritchie, H.* Semi-Lagrangian advection on a Gaussian grid // *Mon. Wea. Rev.*—1987. – Vol. 115. – P. 136–146.
2. *Stainforth A., Cote J.* Semi-Lagrangian interpolation schemes for atmospheric models – A review // *Mon. Wea. Rev.* – 1991. – Vol. 119. – P. 2206–2223.
3. *Strain J.* Semi-Lagrangian method for level set equations // *Journal of Computational Physics.* – 1999. – Vol. 151. – P. 498–533.

Оцінка переходів енергії в атмосфері за даними чисельного моделювання.

Пішняк Д.В., Івус Г.П., Шпиг В.М., Будак І. В.

Для дослідження та оцінки перетворень енергії атмосфери можуть бути використані часткові похідні за часом від деяких метеорологічних величин. Один із можливих способів розрахунку полів часткових похідних базується на застосуванні адвекції, отриманої в напів-Лагранжевому підході. У статті приведений принцип розрахункового алгоритму, представлені приклади застосування часткової похідної в задачах дослідження переходів енергії на основі результатів прогнозу моделі WRF, зроблені висновки про вплив вихідної роздільної здатності даних за часом на отримані результати розрахунків.

Ключові слова: напів-Лагранжева адвекція, часткова похідна, міжвидові перетворення енергії.

Estimation of energy transitions in an atmosphere from data of numeral modelling.

Pishniak D.V., Ivus G.P., Shpyg V.M., Budak I.V.

The partial time derivatives from some meteorological parameters can be used for atmospheric energy transfers estimations. One way to calculate partial time derivatives fields based on advection obtained in semi-Lagrangian approach. In this article the principle of computation algorithm is shown, an example using partial time derivatives for energy transfers analysis grounds on products of WRF model is given, conclusions about influence initial data time resolution on results is obtained.

Key words: semi-Lagrangian advection, time derivative, interspecies energy transfers.