

Расчет трехмерных траекторий воздушных частиц

С. Л. Белоусов, Ю. И. Юсупов

Предлагаются алгоритм и технологическая реализация оперативного расчета трехмерных (пространственных) траекторий воздушных частиц. Методика преемственна к применяемой для расчета двумерных траекторий и является ее обобщением. Технологическая реализация расчетов осуществлена в порядке дальнейшего развития программных средств системы автоматизированного рабочего места (АРМ СИНОП-ТИК), действующей в Гидрометцентре СССР — Главном вычислительном центре Госгидромета СССР с использованием персональных ЭВМ, включенных в локальную информационно-вычислительную сеть. Все программы написаны на языке "С" в среде Microsoft Windows для интегрированной системы Map Maker. Приводятся примеры расчетов.

Введение. Использование траекторных расчетов имеет широкий круг приложений в синоптической практике [10]. При этом в большинстве применяемых методик предусматривается расчет лишь "плоских" (двухмерных) изобарических траекторий на разных уровнях атмосферы. В то же время очевидно, что такой подход имеет, по крайней мере, два существенных ограничения. Одно из них связано с тем, что не принимается во внимание изменение скорости и направления перемещения реальной частицы при ее переходе с одного уровня на другой, где поток может существенно отличаться от потока на исходном уровне (например, при выходе частицы из пограничного слоя в свободную атмосферу или наоборот). В результате моделируемая проекция перемещения частицы на горизонтальную плоскость может заметно отличаться от действительной. Это подтверждено в ряде исследований. В работе [12], выполненной во французской метеослужбе на основе данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) о составляющих скорости ветра и о вертикальной скорости, имевшихся с 6-часовыми интервалами по времени, приводятся результаты расчета двумерных и трехмерных траекторий для условий Средней Европы. Показано, что при расчетах на сроки 48 ч и более при некоторых синоптических ситуациях различия между теми и другими траекториями могут быть весьма существенными. При этом характерная величина вертикальной скорости имела порядок 10 гПа/3 ч .

Другое новое качество, которое может быть получено в рамках модели трехмерных траекторий, состоит в возможности более точной оценки ожидаемого изменения температуры и влажности в пункте. Это уточнение обеспечивается двумя факторами. Первый из них состоит в том, что исходные значения указанных метеозлементов в частице находятся не только по данным на некоторой одной изобарической поверхности, но и с привлечением значений последних в особых точках, находящихся между изобарическими поверхностями, путем применения трехмерной интерполяции при объективном анализе температуры и влажности. Второй фактор состоит в возможности оценивать индивидуальные изменения названных метеозлементов в частице при вертикальных перемещениях последней, т. е. существенно уточнять оценку, доступную при учете только горизонтальной адвекции. Очевидно, что данное уточнение может быть особенно значимым в областях интен-

сивных вертикальных движений, связанных с существенными преобразованиями атмосферной циркуляции, а также в горных районах.

Как известно, рассчитанные поля вертикальной скорости вместе с горизонтальными траекториями воздушных частиц являются важными "рабочими инструментами" синоптика-прогнозиста. Однако согласованное использование этих двух видов данных требует определенного навыка, т. е. зависит от мастерства синоптика. Поэтому получение синоптиком в рамках одного "объекта" информации о вертикальном и о горизонтальном перемещении частицы объективизирует использование этих данных и сокращает затраты времени для принятия решений (в первую очередь — при прогнозе температуры и влажности).

Одна из первых публикаций по использованию трехмерных траекторий [13] содержит сведения по оперативному расчету последних на основе выходной продукции шестислойной полушарной прогностической модели Национального метеорологического центра США [14]. Приводимые в указанной публикации данные свидетельствуют о том, что расчет ожидаемых изменений температуры и влажности перемещающейся частицы на основе предлагаемой автором методики с использованием трехмерных траекторий позволил уточнить прогноз этих же метеозлементов на 24 и 36 ч, получаемый непосредственно в рамках упомянутой гидродинамической модели, за счет устранения нежелательного сглаживания, имеющего место при обычных расчетах по значениям полей в точках сетки.

В данной статье описываются методика и первый опыт численного расчета трехмерных траекторий в Гидрометцентре СССР по данным оперативных прогностических моделей, осуществленный в рамках технологии интегрированной системы Map Maker, используемой в локальной сети персональных компьютеров Главного вычислительного центра (ГВЦ) Госгидромета СССР. Алгоритм и технология расчета траекторий ориентированы на их реализацию с помощью персональной ЭВМ, основной функцией которой является информационно-вычислительное обслуживание автоматизированного рабочего места синоптика-прогнозиста (АРМ СИНОПТИК). Созданная технология является дальнейшим развитием и обобщением оперативно действующей системы траекторных расчетов в Гидрометцентре СССР для использования в синоптической практике.

Методика и численный алгоритм расчета трехмерных траекторий. Методика расчета обобщает развитую ранее для получения двумерных траекторий применительно к широкому кругу практических применений [5]. В указанной постановке обеспечивается диагностический и прогностический расчет траекторий, имеющих как прямое, так и обратное направление по отношению к движению частиц. Расчет траекторий может производиться для любого пункта в пределах Северного полушария на уровнях изобарических поверхностей от 1000 до 100 гПа. Для получения переносающего потока могут быть использованы полушарные анализы и прогнозы полей скорости ветра или полей геопотенциала (геострофический ветер), полученные по различным моделям (в том числе по моделям зарубежных центров, доступные в виде сводок в коде ГРИД). Допустимое время отслеживания траекторий — до 15 сут; используется разностная схема, свободная от накопления ошибок со временем при интегрировании на длительные сроки.

В предлагаемой постановке перечисленные возможности методики расчета двумерных траекторий в большей их части сохранены. Для получения трехмерных траекторий используется решение уравнений

$$\frac{dx}{dt} = u(x, y, p, t), \quad \frac{dy}{dt} = v(x, y, p, t), \quad \frac{dp}{dt} = \omega(x, y, p, t) \quad (1)$$

с условиями при

$$t = t_0 \quad x = x_0, \quad y = y_0, \quad p = p_0. \quad (2)$$

Здесь $x(t)$, $y(t)$, $p(t)$ — текущие координаты перемещающейся частицы; u , v — горизонтальные составляющие скорости переноса потока, представленные на стереографической плоскости с учетом широтной зависимости масштаба последней; ω — вертикальная скорость в p -системе координат. В случае $\omega = 0$ трехмерные траектории переходят в двухмерные.

Укажем принятую последовательность численного решения (1) на каждом шаге по времени. С помощью третьего из уравнений (1) определяется изменение координаты p с использованием простейшей схемы односторонних разностей по t

$$p_{n+1} = p_n + \omega(x, y, p, t)_n \delta t, \quad (3)$$

где δt — шаг по времени, n — номер шага.

Далее с использованием алгоритма, развитого в [4], определяются приращения горизонтальных координат частицы:

$$x_{n+1} = x_n + u(x_n, y_n, t_n) \delta t, \quad y_{n+1} =$$

$$= y_n + v(x_{n+1}, y_n, t_n) \delta t \quad \text{при } n \text{ четном,}$$

$$y_{n+1} = y_n + v(x_n, y_n, t_n) \delta t, \quad x_{n+1} =$$

$$= x_n + u(x_n, y_{n+1}, t_n) \delta t \quad \text{при } n \text{ нечетном.} \quad (4)$$

Здесь u и v — проинтерполированные по переменной p составляющие скорости переноса потока. Интерполяция производится по данным на двух смежных изобарических поверхностях на уровень, отвечающий полусумме значений p_n и p_{n+1} . Нахождение значений u , v в точках, необходимых для расчетов по (4), по их величинам в точках сетки производится с помощью билинейной интерполяции в пределах сеточного квадрата. С учетом относительно меньшей достоверности данных о поле ω (по сравнению с достоверностью данных о полях u и v) привлечение для нахождения p_{n+1} схемы более точной (и более трудоемкой) по сравнению с (3) не представляется оправданным.

Слой атмосферы, в пределах которого в программе допустим расчет траекторий, ограничен уровнями p_0 (приземное давление) и 300 гПа. Для расчета переноса потока привлекаются данные о u , v , ω в точках сетки на шести уровнях: 1000, 925, 850, 700, 500, 300 гПа. При выходе на некотором шаге по времени текущего значения координаты p перемещающейся частицы за пределы $p_0(x, y)$ или 300 гПа последней приписывается соответствующее предельное значение.

В численной схеме, реализованной в программе траекторных расчетов на ПЭВМ в технологии АРМ СИНОПТИК, шаг по времени δt принят равным 3 ч, шаг по пространству $\delta s = 250 \text{ км}$ на 60° с. ш. на карте полушария в стереографической проекции.

Исходные данные. Используемая информационная база. В технологии траекторных расчетов используются полушарные анализы и прогнозы полей геопотенциала и приземного давления, распространяемые в коде ГРИД для точек сетки с шагом $5 \times 5^\circ$ по области от 20 до 90° с. ш. К числу этих полей относятся данные моделей Гидрометцентра СССР, Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦ СПП) и Национального метеорологического центра (НМЦ) США. С учетом

принятого по каждой из моделей перечня уровней, для которых предусмотрено представление анализов и прогнозов, производится интерполяция данных по высоте, обеспечивающая получение необходимых полей на всех шести уровнях модели трехмерных траекторий. В частности, при использовании комплектов анализов и прогнозов по модели ЕЦ СПП, включающих данные только по трем полям — приземного давления p_0 , температуры T_{850} и геопотенциала H_{500} , — процедура восстановления полей состоит в следующем. По величинам p_0 и T_{850} с помощью уравнения статики определяется высота H_{700} . Далее по значениям H_{1000} (находимым по p_0) и по значениям H_{700} и H_{500} строится аппроксимирующий параболический профиль $H(p)$, позволяющий восстановить недостающие величины H_{925} , H_{850} и H_{300} .

Поля анализов и прогнозов составляющих скорости ветра u , v и вертикальной скорости ω в настоящее время в используемой информационной базе отсутствуют. Поэтому в траекторных расчетах в рамках технологии АРМ предусмотрено нахождение переносимого потока только по геострофическому ветру. При этом поток на уровне 1000 гПа приближенно корректируется введением постоянного отклонения направления ветра на 30° (в сторону низкого давления) и умножением модуля скорости на постоянный коэффициент 0,7.

Поле $\omega(x, y, p)$ на шести уровнях для некоторого срока должно определяться по имеющимся полям геопотенциала за этот же срок с помощью той или иной существующей методики диагностического расчета, не предусматривающей привлечения данных помимо содержащихся в информационной базе. С учетом имеющегося опыта в качестве такой методики был выбран расчет полей ω по уравнению притока тепла (см. [10], § 4.4) с независимым добавлением вклада эффекта трения в пограничном слое, находимого по алгоритму, принятому в квазигеострофических моделях (см. [7], § 11.3). Вертикальная скорость ω в точках сетки находится в виде суммы $\omega = \omega_{\text{дин}} + \omega_{\text{тр}}$, причем "динамическая составляющая" и составляющая вклада приземного трения определяются соответственно по соотношениям

$$\omega_{\text{дин}} = \frac{g\rho}{\gamma_a - \gamma} \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + m \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\}, \quad (5)$$

$$\omega_{\text{тр}} = k_0(p) a_0 + \sum_{i=1}^K k_i(p) \bar{a}^{(i)}. \quad (6)$$

Здесь $a_0 = \Delta p_0$ — лапласиан от поля приземного давления в точке сетки, для которой рассчитывается ω , $\bar{a}^{(i)}$ — осредненное значение величин Δp_0 в точках i -го контура из числа окружающих указанную точку. Убывающие с высотой веса вкладов приземного давления в $\omega_{\text{тр}}$ обозначены $k_0(p)$ и $k_i(p)$.

При вычислении $\omega_{\text{дин}}$ по (5) составляющие скорости u , v находятся с помощью геострофических соотношений, а температура T на некотором уровне определяется конечными разностями по переменной $\ln p$ с помощью уравнения статики по значениям геопотенциала на выше- и нижележащем уровнях (для нахождения T_{300} — односторонняя разность).

Значения $\frac{\partial T}{\partial t}$ находятся по разности величин T в два последовательных срока данных, разделенных 12- или 24-часовым интервалом. При $p = 1000$ гПа $\omega_{\text{дин}} = 0$.

При расчете $\omega_{тр}$ по (6) учитывается только вклад центральной точки (первое слагаемое) и вклад точек первого контура, составленного из 8 точек сетки, окружающих центральную ($K=1$).

Укажем другие модели диагностического вычисления вертикальной скорости на разных уровнях, которые также могут быть применены для траекторных расчетов в технологии АРМ СИНОПТИК как не требующие данных помимо тех, которые имеются в используемой информационной базе. Детальное сравнение вертикальных скоростей, рассчитываемых оперативно различными методами в Гидрометцентре СССР, можно найти в статьях [1, 9], а также в [10] (§ 4.6) и в [8] (§ 3.5).

А. Н. Багровым [2] была разработана и применена на практике для оперативного предвычисления обложных осадков модель расчета вертикальной скорости, основанная на использовании уравнения вихря в квазигеострофическом приближении. Вертикальная скорость находится интегрированием (осреднением) по переменной p слагаемых уравнения начиная от уровня $p_0 = 1000 \text{ гПа}$. На этом уровне поле ω определяется влиянием приземного трения и рассчитывается практически таким же способом, что и в данной работе. Максимальные значения вертикальной скорости, полученные в указанной модели [2], — на уровне 300 гПа (до 250—300 гПа/12 ч); на уровне 850 гПа они достигали 120—150 гПа/12 ч и оказались минимальными на уровне 500 гПа (до 100 гПа/12 ч).

Рассмотренная модель обобщает известную схему расчета ω на основе интегрирования по высоте (по слоям) уравнения вихря скорости, предусматривающую нахождение индивидуальных изменений геострофического вихря ΔH на разных уровнях как разностей этой величины в начале и в конце двухмерных траекторий (см. [10], § 4.3). Обобщение в [2] состоит в переходе к конечно-разностному расчету адвекции вихря вместо использования траекторий.

Более трудоемкий способ расчета ω основан на решении диагностического ω -уравнения, являющегося следствием уравнения вихря скорости и уравнения притока тепла в квазигеострофическом приближении. Практический опыт применения итерационного решения возникающего при этом эллиптического дифференциального уравнения описан, например, в [10], § 4.5. Как и при способе, основывающемся на использовании уравнения притока тепла, здесь возникают трудности, связанные с определением на разных уровнях и в разных областях карты величины параметра статической устойчивости атмосферы $c^2 = R^2 T (\gamma_a - \gamma) / g$, входящего множителем в величину ω .

Рассмотренные выше методы не включают учет влияния рельефа земной поверхности. Частично это ограничение устранено в последующем развитии схемы [2] при ее применении для прогноза осадков [3]: при определении вертикальной скорости на уровне 1000 гПа вклад приземного трения здесь дополнен вкладом обтекания рельефа. Методика более детального учета совместного влияния рельефа и процессов в пограничном слое для определения величины ω на высоте верхней границы последнего была построена в САР-НИГМИ А. М. Горячевым и А. Д. Спекторманом [6] для использования в региональной прогностической модели. Основу этой методики составляет модель пограничного слоя в орографически неоднородном районе, предложенная в Болгарии Н. Годевым и Е. Сираковым [11]. С учетом возможного применения расчета трехмерных траекторий для целей прогнозирования вертикальной стратификации атмосферы рассмотренный метод определения вклада процессов в пограничном слое атмосферы в величину ω заслуживает внимания как один из перспективных для использования вместо соотношения (6) в технологии АРМ СИНОПТИК.

В данной работе мы не ставим своей целью выбор оптимального метода расчета вертикальной скорости, но сосредоточим внимание на отработке методики расчета трехмерных траекторий или заданном поле ω . Поэтому мы ограничимся использованием поля вертикальных скоростей, получаемых простейшим методом — на основе уравнения притока тепла, в которое величина ω входит в явном виде.

Результаты экспериментальных расчетов. Для расчетов траекторий были использованы данные ЕЦСПП: анализ за 12 ч 11 марта 1991 г. и прогнозы на 12 и 24 ч, полученные по этому анализу. Были рассчитаны три "прямые" траектории, начинающиеся на уровне 700 гПа (см. рис. 1). Начальные точки траекторий обозначены кружками. Двухмерные траектории (рассчитанные для уровня 700 гПа) проведены сплошными линиями; на трехмерных траекториях участки нисходящих и восходящих перемещений частиц проведены соответственно сплошными и пунктирными линиями. Зачерненные квадраты служат отметками времени (с интервалами 12 ч). Для трехмерных траекторий при этих квадратах указаны высоты (гПа). На том же рисунке представлено поле ω_{700} (гПа/3 ч), рассчитанное по (5) и (6). Анализы приземного

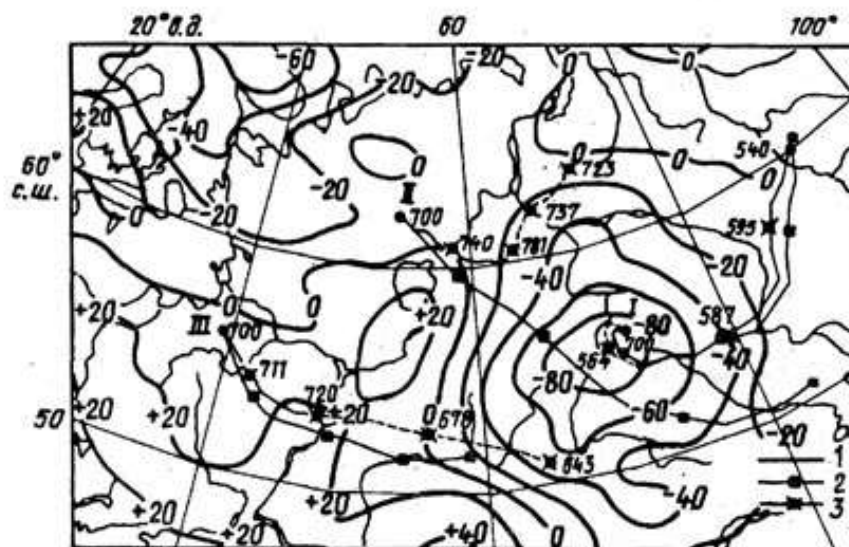


Рис. 1. Поле вертикальной скорости ω ($гПа/3 ч$) на уровне $700 гПа$ в 12 ч 11 марта 1991 г. и прямые траектории воздушных частиц, начинающиеся в этот момент.

1 — изолинии ω_{700} , 2 — двухмерные траектории, 3 — трехмерные траектории.

давления и AT_{500} за тот же срок воспроизведены на рис. 2. Изображения на рисунках генерированы средствами графики системы Map Maker.

Отметим качественно некоторые особенности рассчитанных траекторий, обусловленные расположением областей восходящих и нисходящих движений на уровне $700 гПа$ в начальный момент и характером циркуляции в нижней и средней тропосфере в исходный срок и в последующие 24—48 ч по данным использованных прогностических полей.

Наибольшее изменение высоты за первые 12 ч (подъем на $136 гПа$) претерпела частица, движение которой описывается траекторией I (рис.1), начинающейся в очаге интенсивных восходящих движений. При этом, однако, горизонтальное перемещение частицы практически не отличалось от такового по двухмерной траектории, что связано с близостью циркуляции на уровнях 500 и $700 гПа$ в данном районе. В то же время для трехмерной траектории II уже сравнительно небольшого опускания (на $81 гПа$ за первые 24 ч) оказалось достаточно, чтобы перемещающаяся частица вступила в область юго-западных потоков в тылу сформировавшейся в течение последующих 24—48 ч обширной области низкого давления над северной половиной европейской части СССР с центром к востоку от Сыктывкара на приземной карте. Эти потоки и обусловили поворот трехмерной траектории на северо-запад.

Преобразование циркуляции за этот же период в средней тропосфере (на уровне $500 гПа$) определялось быстрым перемещением на восток обширной области низкого давления (с центром над средним течением р. Тобол в начальный момент) и формированием интенсивного западно-северо-западного потока в зоне $50—60^\circ$ с. ш. в рассматриваемом секторе карты (между 40 и 60° в. д.). Указанным преобразованием циркуляции в средней тропосфере и определялся вид двухмерной траектории II, существенно отличающейся от трехмерной.

Наконец, трехмерная траектория III, начальная точка которой располагалась вдали от областей интенсивных вертикальных движений и их значительных горизонтальных градиентов на уровне $700 гПа$ в ис-

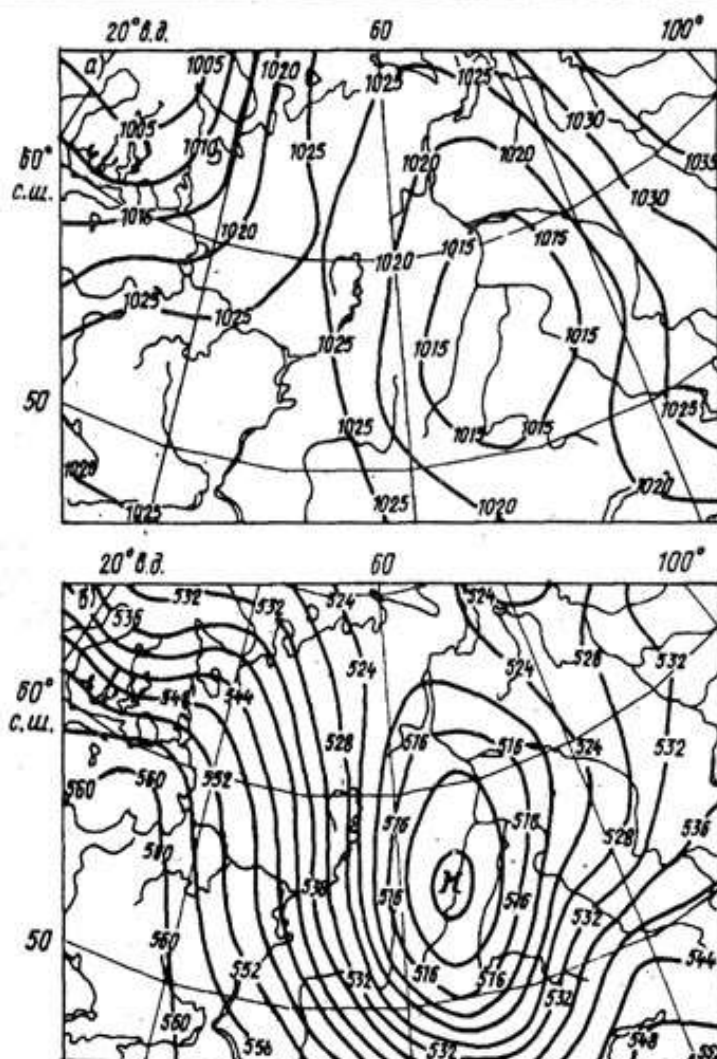


Рис. 2. Карты анализов за 12 ч 11 марта 1991 г. (по данным ЕЦСПП): а — приземная карта, б — карта АТ500.

ходный момент, не претерпела существенных смещений по вертикали: они оказались в пределах от +20 до -57 гПа за 48 ч. Соответственно этому различие в конечном положении точек на двух- и трехмерной траекториях оказалось невелико.

Заключение. Осуществлен методический эксперимент по расчету и отображению пространственных (трехмерных) траекторий воздушных частиц в рамках программных и технических средств АРМ СИНОПТИК на базе персональной ЭВМ, включенной в локальную информационно-вычислительную сеть прогностического центра. Построенный алгоритм и технология расчетов допускают ряд дальнейших обобщений и усовершенствований. К их числу относится использование более совершенной методики диагностического расчета поля вертикальных движений (включая конвективные), определение индивидуальных изменений температуры и влажности в перемещающейся воздушной частице при ее смещениях по вертикали и др.

Авторы выражают признательность заведующему отделом Главного вычислительного центра Госгидромета СССР Ю. Л. Шмелькину за по-

мощь в организации и проведении данной работы и за сделанные им замечания и уточнения по рукописи статьи.

Литература

1. Акулиничева А. А., Федорова Н. Н. Сопоставление вертикальных движений, вычисленных двумя способами. — *Метеорология и гидрология*, 1987, № 1.
2. Багров А. Н. Расчет вертикальных движений воздуха с использованием уравнения вихря скорости. — *Труды Гидрометцентра СССР*, 1965, вып. 144.
3. Багров А. Н. Прогноз обложных осадков при помощи электронной вычислительной машины. — *Метеорология и гидрология*, 1965, № 12.
4. Белоусов С. Л., Пагава Т. С. О точности некоторых численных решений задачи определения траекторий воздушных частиц. — *Метеорология и гидрология*, 1990, № 9.
5. Белоусов С. Л., Пагава Т. С. О расчете траекторий воздушных частиц. — *Труды Гидрометцентра СССР*, 1991, вып. 310.
6. Горячев А. М., Спекторман А. Д. Совместный учет влияния орографии и пограничного слоя в региональной модели прогноза. Рукопись депонирована в ИЦ ВНИИГМИ-МЦД, 1987, № 605 гм-87.
7. Кибель И. А. Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды. — М., Гостехиздат, 1957.
8. Орлова Е. М. Краткосрочный прогноз атмосферных осадков. — Л., Гидрометеиздат, 1979.
9. Паршина Л. Н. Сравнение вертикальных скоростей, вычисляемых по различным прогностическим схемам. — *Труды Гидрометцентра СССР*, 1988, вып. 302.
10. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Изд. 3, ч. 1. — Л., Гидрометеиздат, 1986.
11. Godev N., Sirakov E. Numerical forecasting of pressure fields by considering the mutual influence of orography, thermal nonhomogeneity, and surface friction. — In: *Nowcasting II. Mesoscale observations and very short-range weather forecasting. Proc. of 2nd Intern. Symp. on Nowcasting. Norrchooping, Sweden, 3-7 Sept. 1984. Paris, 1984.*
12. Martin D., Mithieux C., Strauss B. On the use of the synoptic vertical wind component in a transport trajectory model. — *Atmospheric Environment*, 1987, vol. 21, No. 1.
13. Reap R. M. An operational three-dimensional trajectory model. — *J. Appl. Met.*, 1972, vol. 11, No. 12.
14. Shuman F. G., Hovermale J. B. An operational six-layer primitive equation model. — *J. Appl. Met.*, 1987, No. 7.

Гидрометеорологический
научно-исследовательский
центр СССР,
Главный вычислительный центр
Госгидромета СССР

Поступила
12 V 1991

COMPUTATIONS OF THREE-DIMENSIONAL TRAJECTORIES OF AIR PARTICLES

S. L. Belousov and Yu. I. Yusupov

An algorithm and a way for technological realization of operational computations of three-dimensional (spatial) trajectories of air particles are proposed. The method is a generalization and continuation of the one used in computations of the two-dimensional trajectories. The technological realization of computations is performed as a further development of the software on SYNOPTIC workstation functioning at the Hydrometeorological Center of the USSR and the Main Computing Center (Goskomhydromet of the USSR) using the PCs connected into a local network. The software was written in the C programming language under Microsoft Windows for the Map Maker integrated system. Examples of computations are given.