

Эволюция влаги в атлантических циклонах

А. В. Гавриков*

Изложены результаты численного исследования эволюции влаги в циклоне на основе моделирования 22 циклонов, зародившихся над поверхностью Атлантического океана в 2004—2006 гг. Расчеты выполнены с помощью негидростатической модели WRF. Сравнение результатов моделирования с данными анализа Национального центра по атмосферным исследованиям США показало, что модель WRF достаточно хорошо воспроизводит эволюцию циклонов и поле влажности, поэтому может быть использована для оценки эволюции влаги в циклонах. Получены данные об изменениях влагозапаса столба воздуха и влагозапаса облаков и осадков в циклоне от его зарождения до заполнения. Сделан вывод, что на стадии углубления циклона влагозапас столба воздуха убывает почти в 2 раза вследствие отрицательного баланса между потоками влаги из атмосферы с осадками и потоками влаги в атмосферу в результате испарения с морской поверхности.

Введение

Исследованию циклонической деятельности в Атлантике посвящена обширная литература. Основная масса работ относится к теоретическому и экспериментальному изучению циклогенеза — центральной проблеме тепло- и массообмена в атмосфере. Заметно меньше работ посвящено эволюции влаги на разных этапах развития циклонов. Как правило, процессы переноса влаги с поверхности океана и ее дальнейшее превращение в циклоне рассматриваются с точки зрения влияния потоков скрытого тепла на циклогенез.

Работы по изучению эволюции атмосферной влаги в процессе образования, углубления и диссипации циклонов весьма немногочисленны. Среди них можно отметить исследования [8, 22], в которых на основе проинтегрированных по вертикали уравнений притока влаги делались оценки баланса влаги в областях циклонической деятельности. Между тем вопрос поступления влаги в циклон, изменения ее фазового состояния в системе циклонической циркуляции и выпадения в виде осадков заслуживает самостоятельного рассмотрения, поскольку именно с циклонами из океанов на континенты переносится значительное количество влаги, в том числе и в виде осадков. Качественно цепочка превращения влаги в циклоне более или менее ясна: на стадии зарождения или “подготовительной” стадии циклона происходит накопление водяного пара в атмосфере в результате его испарения с поверхности океана. На важность потоков влаги (и скры-

того тепла) на этом этапе для дальнейшего циклогенеза указывалось в ряде работ (см., например, [16]). Далее в процессе развития циклонической циркуляции часть водяного пара превращается в облачность, а затем в осадки. С течением времени под действием осадков область циклона иссушается. Эту качественную картину хотелось бы подкрепить некоторыми количественными оценками влагозапаса циклонов на разных стадиях их развития, соотношениями между запасами влаги в виде пара, облачности и осадков, а также балансом между притоком и стоком влаги на нижней границе атмосферы. Получению хотя бы частичных ответов на эти вопросы и посвящена настоящая работа.

Эволюция полей влажности, облачности и осадков исследовалась с помощью квазилагранжева подхода, т. е. вдоль траектории циклона от момента его зарождения до диссипации. При этом подходе циклон представляется в виде крупной “частицы”, в пределах которой рассматривается эволюция интегральных характеристик атмосферной влаги. Такого рода подход использовался в работе Куо и Антеса [15] при изучении баланса тепла и влаги в мезомасштабных конвективных системах. Методика квазилагранжевой диагностики будет описана ниже.

Поскольку в стандартных данных анализа состояния атмосферы имеется только информация о содержании водяного пара, для решения поставленной задачи было решено воспользоваться какой-либо математической моделью атмосферы, которая дает минимум необходимой информации: потоки влаги с поверхности океана, трехмерные поля влажности, облачности и осадков, а также осадки у поверхности земли. Необходимо также, чтобы модель обладала достаточной степенью реализма в воспроизведении упомянутых выше полей.

В качестве такой модели была выбрана негидростатическая система WRF (Weather Research and Forecasting) ARW версии 2.1, разработанная в Национальном центре по атмосферным исследованиям США (NCAR) совместно с другими крупными организациями. Она является свободно распространяемой моделью, имеет достаточно мощное динамическое ядро, базирующееся на негидростатических упругих уравнениях, а также широкий набор параметризаций физических процессов, позволяющий подбирать конфигурацию модели, исходя из характера решаемой задачи. Выходная продукция модели содержит все переменные, необходимые для решения поставленной задачи изучения водного баланса циклонов. Довольно подробное описание модели имеется в работе [20].

Конфигурация модели определяется в основном набором используемых в ней параметризаций, исходя из решаемых задач. Поскольку основная цель настоящей работы состояла в изучении эволюции циклонических возмущений над Атлантикой, что требовало большой области, при выборе процедур параметризации автор исходил из компромисса между полнотой и вычислительной стоимостью разных процедур, а также имеющегося опыта их применения. При этом учитывалось то обстоятельство, что для изучения баланса влаги желательно иметь достаточно полные процедуры параметризации микрофизических процессов, конвекции и пограничного слоя атмосферы.

Для параметризации микрофизических процессов была выбрана схема WSM6, в которой учитывается смешанная фаза облаков и осадков [18].

* Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук.

При выборе параметризации конвективных процессов решено было остановиться на усовершенствованной схеме Канна — Фритша [11, 12], так как она имеет лучшую обратную связь с мезомасштабной динамикой атмосферы по сравнению с другими схемами, включенными в модель.

При расчете длинноволновой радиации предпочтение было отдано схеме RRTM [19], так как сравнениями с полинейными расчетами была подтверждена ее высокая точность, а также в связи с тем, что метод распределения коррелированных K обладает рядом преимуществ по сравнению с полосными моделями и обеспечивает большое разрешение в области больших коэффициентов поглощения, что повышает точность расчетов. Для расчетов потоков коротковолновой радиации использовалась схема Дудья из соображений экономичности [7]. Для параметризации пограничного слоя атмосферы была выбрана схема Eta, высокое качество которой было подтверждено многими экспериментами [9, 10].

Из трех моделей подстилающей поверхности и почвы в системе WRF выбрана схема NOAH. Выбор был сделан на основе ее многочисленных испытаний с другими моделями (Eta, MM5), которые показали хорошие результаты [1—6].

Организация расчетов

Для расчетов использовались окончательные глобальные оперативные анализы состояния атмосферы и подстилающей поверхности, подготовленные в NCEP после получения всех доступных данных наблюдений (срок ожидания 6 ч), на основе которых выбирались циклонические образования. В качестве критериев выбора служили продолжительность существования циклона, его интенсивность, направление и пройденный путь — для оценки размера области интегрирования. Область выбиралась таким образом, чтобы можно было проследить эволюцию циклона от момента его зарождения до диссипации. В качестве начальных и граничных условий использовался оперативный анализ NCEP/NCAR, который имеет разрешение $1 \times 1^\circ$ по горизонтали, 26 уровней по вертикали и 6 ч по времени. Данные представлены в формате GRIB (версия 1). Эти данные предоставляют для системы моделирования всю необходимую информацию.

Для каждого случая расчеты проводились следующим образом. На основе предварительного анализа определялись начальное и конечное положения циклонов и отрезок интегрирования по времени, исходя из этой информации выбиралась область интегрирования для каждого эксперимента. Прогностическая информация сохранялась через каждые 6 ч интегрирования по времени (в синоптические сроки). Расчеты во всех экспериментах велись на сетке с разрешением 20 км по горизонтали. По вертикали использовался 31 уровень от поверхности земли до изобарической поверхности 50 гПа с шагом от 56 м у поверхности до 1668 м вблизи верхней границы. Далее на всем временном отрезке по приведенному к уровню моря давлению у поверхности земли определялся максимальный горизонтальный размер циклона. Затем вокруг циклона описывалась прямоугольная область таким образом, чтобы в нее вписывалась последняя замкнутая изобара. Далее при расчете диагностических переменных эта область ис-

пользовалась на всех стадиях развития циклона, т. е. при диагностике прослеживаемая циклоническая “частица” сохранялась одинаковой во все моменты. В начальной стадии циклона она могла быть на приземной карте заметно больше циклона. При расчете средних по площади значений сохранение тождественности территорий, возможно, не очень существенно, но автору представляется, что лучше сохранять один и тот же масштаб осреднения на разных стадиях циклонической деятельности, прослеживая при квазилагранжевом подходе частицу одного и того же размера.

После того, как размер квадрата был определен, он центрировался в каждый рассматриваемый момент времени относительно циклона, и каждые 6 ч в пределах этого квадрата рассчитывались диагностические переменные, расчет проводился до высоты 12 км с шагом 500 м.

В настоящей работе будут рассмотрены только те циклоны, которые зародились над поверхностью Атлантического океана.

Оценка качества модели

Так как выводы относительно эволюции влаги в циклоне делаются на основе выходной продукции модели, естественно проверить, насколько успешно модель воспроизводит динамические и термодинамические переменные. Детальная проверка качества прогнозирования всех переменных представляет самостоятельную задачу, которую нужно было бы решать над районами с густой сетью наблюдений. В настоящей работе в целях экономии вычислительных ресурсов проверка качества моделирования проводилась параллельно с расчетами прогнозов над акваторией Атлантического океана, где материалом для проверки служили повторные анализы NCEP. Применительно к задаче прослеживания эволюции циклонов было наиболее естественным проконтролировать, насколько успешно модель WRF воспроизводит траектории движения циклонов и их глубину. С этой целью оценивались различия положений центров приземных циклонов и давления в центре циклона по данным анализа NCEP и по прогнозам модели WRF на отрезке интегрирования ее по времени, а также разность между влагозапасами WRF и NCEP, рассчитанными для одинаковой по размеру области.

В таблице представлены результаты проверки успешности прогноза траекторий 22 циклонов над Северной Атлантикой в 2004—2006 гг., давления в их центрах и влагозапаса на срок до 144 ч. Здесь и далее разность означает модельное значение минус значение по данным анализа NCEP. Представленная в таблице нормированная смещенность влагозапаса Q_v рассчитывалась по формуле

$$\Delta Q_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q_v^{\text{WRF}} - Q_v^{\text{NCEP}}}{Q_v^{\text{NCEP}}},$$

где N — число случаев.

Из данных таблицы видно, что модель достаточно хорошо воспроизводит поле давления и траекторию движения циклонов. Со временем она дает смещенность в сторону меньших значений давления и большего расстояния между центрами циклонов. Разность влагозапасов убывает от

Результаты оценки качества модели, произведенной по данным 10 экспериментов

Заблаговременность прогноза, ч	Разность между		Средний влагозапас столба воздуха	
	положениями центра, км	давлением в центре, Па	нормированная смещенность, %	разность данных модели и анализа, кг/м ³
0	75	-0,8	-3,9	-0,5
24	150	-1,0	-10,2	-2,6
48	200	-2,0	-13,6	-3,3
72	250	-3,0	-20,1	-4,3
96	250	-3,5	-21,5	-4,1
108	300	-1,0	-20,3	-4,0
144	250	-0,5	-20,1	-3,8

-0,5, но быстро стабилизируется на уровне -4 кг/м², а их нормированная смещенность не превышает по модулю 21,5% на времени интегрирования до 144 ч. Разумно было бы ожидать 0% на первом шаге по времени, однако этого не происходит, вероятно, вследствие погрешностей осреднения по большим областям и переинтерполяции с разных сеток.

Диагноз результатов моделирования

Был разработан блок диагноза, с помощью которого проводилась оценка разных характеристик циклона по выходной продукции модели. Основное внимание уделено оценке интегральных характеристик влажности в циклоне: содержанию водяного пара, облачной и осаждающейся воды в столбе воздуха, а также балансу влаги в циклоне. Влагозапас столба воздуха Q_v , водозапас облаков Q_c и водозапас осадков Q_r рассчитывались по следующей формуле:

$$Q_{\psi} = \int_{z_0}^{z_1} \frac{q_{\psi}}{\alpha} dz, \tag{1}$$

где $q_{\psi} = q_v, q_c, q_r$ — отношение смеси водяного пара, водность облаков и водность осадков соответственно (эти трехмерные поля есть в составе выходной продукции модели); z_0 и z_1 — нижняя и верхняя границы области соответственно, α — удельный объем; $Q_{\psi} = Q_c, Q_v, Q_r$; переменные Q_v, Q_c и Q_r имеют размерность кг/м² или мм.

Величина потока влаги с поверхности бралась напрямую из выходных данных модели (QFX , кг/(м² · с)). Поток влаги на поверхность в результате выпадения осадков в выходной продукции отсутствует, но имеются накопленные осадки, выпавшие с момента начала интегрирования (R , кг/м² или мм). По значениям R за каждые 6 ч рассчитывался поток осадков P на нижней границе области:

$$P = \frac{dR}{dt} = \frac{V_T q_r}{\alpha}, \tag{2}$$

где V_T — скорость гравитационного оседания дождя.

Для анализа вертикальной и временной изменчивости полей влажности рассчитывались средние профили водяного пара $\langle q_v \rangle_{xy}$, водности облаков $\langle q_c \rangle_{xy}$ и водности осадков $\langle q_r \rangle_{xy}$:

$$\langle q_{\psi} \rangle_{xy}(z, t) = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (q_{\psi})_{ij}. \tag{3}$$

Здесь и далее I и J — число узлов сетки по осям x и y .

Далее были получены средние по всей области значения влагозапаса атмосферы $\langle Q_v \rangle_{xy}$, водозапаса облаков $\langle Q_c \rangle_{xy}$ и осадков $\langle Q_r \rangle_{xy}$ и полный влагозапас $\langle Q_t \rangle_{xy}$:

$$\langle Q_{\psi} \rangle_{xy}(t) = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (Q_{\psi})_{ij}, \tag{4}$$

$$\langle Q_t \rangle_{xy}(t) = \langle Q_v \rangle_{xy} + \langle Q_c \rangle_{xy} + \langle Q_r \rangle_{xy}. \tag{5}$$

При вычислении водного баланса диагноз полей влажности, облачности и осадков строился на основе уравнений переноса этих субстанций, которые могут быть представлены в следующем общем виде:

$$\frac{dq_v}{dt} = F_T + S_{\text{evp}} - S_{\text{cond}}, \tag{6}$$

$$\frac{dq_c}{dt} = F_T + S_{\text{cond}} - S_{\text{rain}}, \tag{7}$$

$$\frac{dq_r}{dt} = - \left(\frac{V_T q_r}{dz} \right) + S_{\text{rain}} - S_{\text{evp}} + F_T, \tag{8}$$

где V_T — гравитационная скорость осаднения осадков; F_T — турбулентные притоки каждой субстанции; S_{evp} — приток водяного пара в результате испарения осадков; S_{cond} — переход водяного пара в конденсат; S_{rain} — переход облачных частиц в частицы осадков.

Производя интегрирование по вертикали, осредняя по горизонтали и сохраняя турбулентные потоки только на нижней границе в уравнении (6), получим (6)–(8) в виде

$$\frac{d \langle Q_v \rangle_{xy}}{dt} = \langle QFX \rangle_{xy} + \left\langle \int_{z_0}^{z_1} S_{\text{evp}} dz \right\rangle_{xy} - \left\langle \int_{z_0}^{z_1} S_{\text{cond}} dz \right\rangle_{xy}, \tag{9}$$

$$\frac{d \langle Q_c \rangle_{xy}}{dt} = \left\langle \int_{z_0}^{z_1} S_{\text{cond}} dz \right\rangle_{xy} - \left\langle \int_{z_0}^{z_1} S_{\text{rain}} dz \right\rangle_{xy}, \tag{10}$$

$$\frac{d \langle Q_r \rangle_{xy}}{dt} = - \langle P \rangle_{xy} + \left\langle \int_{z_0}^{z_1} S_{\text{rain}} dz \right\rangle_{xy} - \left\langle \int_{z_0}^{z_1} S_{\text{evp}} dz \right\rangle_{xy}, \tag{11}$$

где $V_T < 0$, а первый член в правой части (11) представляет интенсивность осадков у поверхности земли.

При сложении уравнений (9)–(11) большая часть членов, связанных с источниками (стоками), сокращается, и в конечно-разностной форме уравнение для изменения полного влагозапаса воздуха приобретает вид

$$\frac{\Delta \langle Q_t \rangle_{xy}}{\Delta t} = \langle QFX \rangle_{xy} - \langle P \rangle_{xy}. \tag{12}$$

Для получения членов в правой части этого уравнения рассчитывались осредненные по горизонтали значения потока влаги с подстилающей поверхности и интенсивности осадков:

$$\langle QFX \rangle_{xy} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (QFX)_{ij}, \quad (13)$$

$$\langle P \rangle_{xy} = \left\langle \frac{\Delta R}{\Delta t} \right\rangle_{xy} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\frac{\Delta R}{\Delta t} \right)_{ij}. \quad (14)$$

Шаг по времени $\Delta t = 6$ ч (промежуток времени между последовательными выдачами результатов интегрирования модели), значения потоков QFX на поверхности брались в виде полусуммы значений в начале и конце отрезка Δt .

Таким образом при квазилагранжевом подходе и гипотезе об отсутствии турбулентного обмена влагой на боковых и верхней границах уравнение сохранения для полного влагозапаса столба воздуха приобретает очень простой вид, констатируя, что индивидуальные изменения полного влагозапаса определяются разностью потоков в атмосферу и из атмосферы на земную поверхность.

Для получения фоновой информации о температуре поверхности океана и термической стратификации приводного слоя рассчитывались средняя по области температура воздуха на высоте 2 м (T_2), средняя температура поверхности океана (T_s) и разность между температурой поверхности океана и температурой воздуха на высоте 2 м:

$$\langle T_2 \rangle_{xy} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (T_2)_{ij}, \quad (15)$$

$$\langle T_s \rangle_{xy} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (T_s)_{ij}, \quad (16)$$

$$\langle \Delta T \rangle_{xy} = \langle T_s \rangle_{xy} - \langle T_2 \rangle_{xy}. \quad (17)$$

Результаты численных экспериментов

По представленной выше методике были проведены моделирование и диагностика 22 циклонов, их траектории представлены на рис. 1. Средний размер диагностической области составил 1500×1500 км, при этом значения колебались от 700 до 2500 км. Поскольку каждый циклон имеет разное время существования, представить иллюстративный материал достаточно сложно. Поэтому ниже будут приведены данные об эволюции компонентов водного баланса на примере циклона, имевшего место в Атлантике в период с 11 по 18 октября 2005 г. (его траектория на рис. 1 выделена жирной линией). Как уже упоминалось в разделе, посвященном организации расчетов, вся диагностика проводилась в области, следовавшей за циклоном и имевшей размер этого циклона в момент его максимального горизонтального развития.

В первую очередь имеет смысл оценить эволюцию влагозапаса атмосферного столба $\langle Q_v \rangle_{xy}$ в течение всего времени существования барического образования. Эволюция $\langle Q_v \rangle_{xy}$ отражена на рис. 2а. Видно, что особенно сильное убывание влагозапаса происходит на стадии углубления

циклона. В течение первых 36 ч циклон постепенно иссушается почти вдвое. Это происходит, как будет показано ниже, вследствие выпадения осадков и его миграции из тропической зоны на север. На 84-м часу развития исследуемый циклон начал взаимодействие с менее интенсивным циклоном, и какое-то время они вращались вокруг "общего центра масс". Это подтверждается траекторией (петля на рис. 1) и имеет очевидный отклик не только на ходе давления, но и в кривой влагозапаса.

На рис. 2б представлены сразу два параметра: влагозапас облаков $\langle Q_c \rangle_{xy}$ и осадков $\langle Q_r \rangle_{xy}$. Их максимальные значения приходятся на момент быстрого углубления циклона. В полях $\langle Q_c \rangle_{xy}$ и $\langle Q_r \rangle_{xy}$ также имеется отклик на вторичную интенсификацию циклона на временном интервале 84—96 ч.

Рассмотрим эволюцию интенсивности осредненных по всей области осадков у поверхности земли (рис. 3). Как видно на рис. 3, максимум интенсивности осадков совпадает с участком падения давления, некоторое плато в интенсивности осадков — со стадией регенерации циклона на временном интервале 84—96 ч.

Далее была проанализирована эволюция составляющих уравнения баланса (12). На рис. 4 представлены значения трех компонентов этого уравнения, а также значения дисбаланса D , рассчитанного по формуле

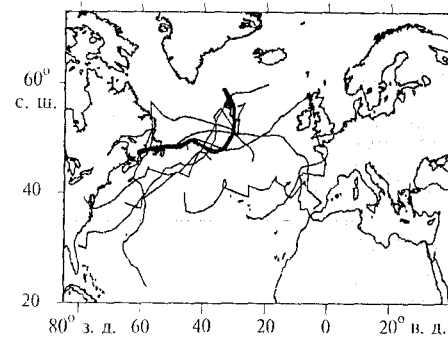


Рис. 1. Траектории исследованных циклонов.

Жирной линией указан случай, который рассматривается подробно в тексте статьи.

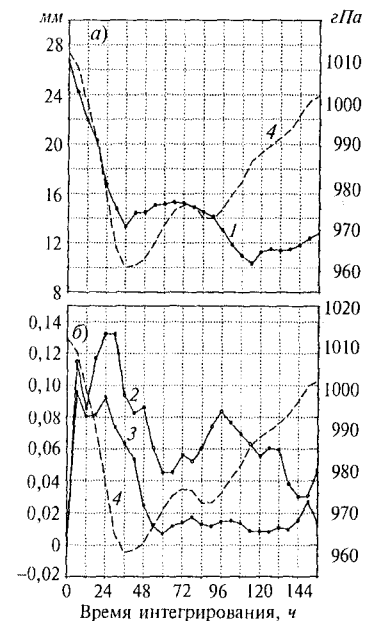


Рис. 2. Изменения со временем усредненных по области циклона влагозапаса (а; 1), влагозапаса облаков (б; 2) и осадков (б; 3) на фоне изменения давления (4).

$$D = \langle QFX \rangle_{xy} - \frac{\Delta \langle Q_i \rangle_{xy}}{\Delta t} - \langle P \rangle_{xy}. \quad (18)$$

Отметим, что расчет левой части уравнения (12) проводился с помощью метода центральных разностей, поэтому на рис. 4 отсутствуют данные в начале и конце расчетов. Из характера распределения кривых видно, что на стадии углубления циклона и его максимального развития (в первые 60 ч) сток влаги из атмосферы в результате осадков намного превосходит поток влаги в атмосферу с поверхности океана. Поэтому влагозапас атмосферного столба практически все время убывает, и очень незначительное его увеличение имеется лишь на стадии затухания циклона. Дисбаланс на начальном этапе быстро уменьшается и достигает минимума (−0,47 мм/ч) к 40 ч, в период углубления циклона и интенсивного осадковывпадения, затем кривая стремительно возвращается к значениям, близким к нулю.

Для оценки средней относительной величины дисбаланса на всем отрезке интегрирования по времени рассчитывалось его значение, нормированное на среднее абсолютное значение всех компонентов уравнения (12):

$$D_B = \left(\frac{1}{n} \sum_{n=1}^N \frac{3\bar{D}}{|\langle QFX \rangle_{xy}| + \left| \frac{\Delta \langle Q_i \rangle_{xy}}{\Delta t} \right| + |\langle P_{xy} \rangle|} \right) \cdot 100\%, \quad (19)$$

где n — шаг по времени. Оказалось, что $D_B = -40\%$, т. е. дисбаланс является достаточно заметным. Это связано, по-видимому, с тем, что подход является квазилагранжевым, а не полностью лагранжевым (циклон не переносится как жидкая частица, а движется с некоторой фазовой скоростью,

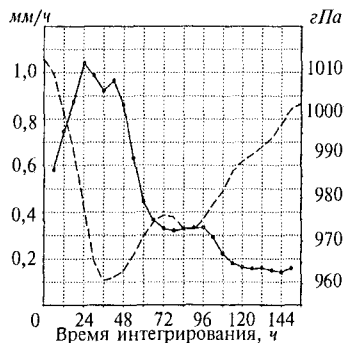


Рис. 3. Эволюция интенсивности осадков (сплошная линия) и давления в центре циклона (пунктир) со временем.

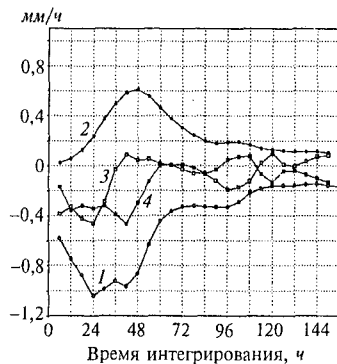


Рис. 4. Изменение со временем компонентов уравнения баланса.

1 — интенсивность потока осадков, взятая с обратным знаком; 2 — интенсивность испарения; 3 — изменение суммарного влагозапаса атмосферы; 4 — дисбаланс влаги.

отличной от вектора скорости, присутствующей в операторе адвекции). Поэтому неизбежно имеет место дополнительный адвективный обмен на границах, который принимается нулевым в уравнении (12), построенном на полностью лагранжевом принципе. Определенные ошибки возникают также при аппроксимации производных по времени при вычислении интенсивности осадков и влагозапаса. Именно с этим связаны особенно большие значения дисбаланса на стадии развития циклона, в течение которой происходят быстрые изменения слагаемых в уравнении (12). Тем не менее рисунки типа рис. 4 дают самостоятельную интересную информацию об эволюции потоков влаги через нижнюю границу атмосферы и ее притоках (стоках) в столбе атмосферы на разных стадиях развития циклона.

Аналогичный анализ был проведен для остальных 21 циклона. Ниже будут представлены основные обобщенные характеристики, не требующие дополнительных иллюстраций.

Необходимо отметить, что в большинстве случаев циклон в ходе своего развития иссушался и лишь в одном случае из 22 происходило накопление влаги по мере его эволюции. Средний коэффициент отношения максимального влагозапаса к минимальному составляет около 0,5. Таким образом циклон в ходе своего существования иссушается в среднем в 2 раза. Это частично связано с тем, что в подавляющем большинстве случаев циклоны зарождались в более южных широтах, где атмосфера содержит больше водяного пара, а затем перемещались в северные, более холодные, широты. В основном же иссушение атмосферы в циклонах происходило в сравнительно короткий период (~ 36—48 ч) углубления циклона, когда выпадает максимум осадков.

Для влагозапаса облаков наиболее характерным максимальным значением является 0,07—0,1 мм. Оно обычно отмечается в период от зарождения до максимальной интенсивности циклона. Для влагозапаса осадков характерное максимальное значение — 0,04 мм. При этом максимум всегда приходится на стадию наиболее интенсивного падения давления. Максимумы влагозапаса облаков и осадков почти всегда совпадают по времени. В некоторых случаях максимум влагозапаса осадков немного запаздывает.

В рассмотренных экспериментах максимальная интенсивность осадков изменялась от 2 до 8 мм/ч. При этом во всех случаях она приходилась на период углубления циклона.

Отдельное внимание было уделено потоку влаги с поверхности океана. В среднем для всех случаев максимальное испарение превышало минимальное в 6 раз. При этом максимум всегда приходится на момент минимального давления или на стадию интенсивного углубления.

Анализ дисбаланса влаги в 22 циклонах показал, что преобладает отрицательная смещенность (сток под действием осадков превышает приток влаги в результате испарения). В среднем $D_B = -49\%$. Наибольшие значения смещенности всегда приходятся на время выпадения интенсивных осадков. Запаздывание максимума интенсивности испарения по сравнению с максимумом интенсивности осадков наблюдалось практически во всех случаях.

Выводы

1. Модель WRF, как инструмент настоящего исследования, показала хорошее качество прогноза. Расстояние между центром циклона по данным повторного анализа NCEP и рассчитанным по модели составляет в среднем 200 км (необходимо помнить, что горизонтальное разрешение анализа NCEP составляет 1°, а разрешение модели — 20 км, что делает неразличимыми отклонения менее 70 км). Разность между минимальными значениями давления в центре циклона по модельным расчетам и данным анализа составляет 1—3 гПа. При этом модель всегда немного занижает давление. Качество расчета влагозапаса столба воздуха слабо зависит от заблаговременности прогноза. В целом рассчитанный влагозапас смещен в сторону меньших значений, однако нормированная смещенность не превышает по модулю 21% на отрезке интегрирования до 144 ч.

2. На стадии углубления циклона происходит почти двухкратное уменьшение влагозапаса, которое сравнительно мало изменяется затем на стадии заполнения циклона. Это объясняется тем, что сток влаги из атмосферы в результате осадков на стадии углубления циклона существенно превышает приток влаги в атмосферу вследствие испарения с поверхности океана. Определенное значение имеет также то обстоятельство, что большинство рассмотренных циклонов сформировались в более низких широтах, а затухали в более высоких, поэтому с течением времени испарение с более холодной поверхности океана уменьшалось.

3. Максимумы водозапаса облаков и осадков для всех исследованных случаев составляют от 0,7 до 1,5 мм и от 0,3 до 0,5 мм соответственно. Они всегда приходятся на стадию наиболее интенсивного углубления циклона, после которого эти величины резко убывают.

4. Поток влаги с поверхности океана также почти всегда максимален в стадии зарождения циклона, после чего он убывает. В среднем отношение максимальных потоков к минимальным составляет 5—6.

5. Квазилагранжева методика, примененная к таким крупным “частицам”, как циклон, а также процедура дискретизации, сделанная с большим шагом по времени, дают заметные (в среднем около 50%) отклонения от баланса влаги в упрощенной лагранжевой задаче сохранения, описываемой в уравнении (12).

Литература

1. ATMET MM5/RAMS Fine Grid Meteorological Modeling for September 8—11 1993 Ozone Episode. Final Report. — California, Environ Int. Corporat. Novato, 2001, 37 p.
2. ATMET Initial Modeling of the August 2000 Houston-Galveston Ozone Episode. /Prep. by J. W. Nielsen-Gammon. — Texas A&M University, 2001, 71 p.

3. ATMET High Resolution (1.33 km) MM5 Modeling of the September 1993 COAST Episode: Sensitivity to Model Configuration and Performance Optimization. Final Report. — California, Environ Int. Corporat. Novato, 2002, 62 p.
4. ATMET MM5 Simulations for TexAQ5 2000 Episode. Final Report. — Boulder, Colorado, ATMET, LLC, 2003, 101 p.

5. ATMET MM5 Simulations for TexAQ5 2000 Episode. Task 3: Sensitivity to Modifications of the MRF PBL Scheme. — Boulder, Colorado, ATMET, LLC, 2003, 37 p.
6. ATMET MM5 Simulations for TexAQ5 Episode. Task 4: Review of the TKE PBL Schemes in MM5. — Boulder, Colorado, ATMET, LLC, 2003, 15 p.
7. Dudhia J. Numerical study of convection observed during winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. — J. Atmos. Sci., 1989, vol. 46, No. 20, pp. 3077—3107.
8. Gyakum J.-R. and Danielson R. E. Analysis of meteorological precursors for ordinary and explosive cyclogenesis in the western North Pacific. — Mon. Wea. Rev., 2000, vol. 128, No. 3, pp. 851—863.
9. Janjic Z. I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in NCEP meso model. — NCEP Office Note, 2002, No. 437, 61 p.
10. Janjic Z. I. The surface layer in the NCEP Eta model. — Proc. Eleventh Conf. on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 1996, 19—23 August, pp. 354—355.
11. Kain J. S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. — J. Clim. Appl. Meteorol., 2004, vol. 43, No. 1, pp. 170—181.
12. Kain J. S. and Fritsch J. M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. — J. Atmos. Sci., 1990, vol. 47, No. 23, pp. 2784—2802.
13. Kasahara A. Various vertical coordinate systems used for numerical weather prediction. — Mon. Wea. Rev., 1974, vol. 102, No. 7, pp. 509—522 (see also Corrigendum: Mon. Wea. Rev., 1975, vol. 103, No. 9, p. 664).
14. Klemp J. B., Skamarock W. C., and Dudhia J. Conservative split-explicit time inte-

gration methods for the compressible nonhydrostatic equations. Draft Manuscript. /WRF Eulerian Prototype Model Equations Height and Mass Vertical Coordinates. — Boulder, Colorado, NCAR, 24 October 2000, 14 p.
15. Kuo Y.-H. and Anthes R. A. Mesoscale budget of heat and moisture in convective system over the Central United States. — Mon. Wea. Rev., 1984, vol. 112, No. 8, pp. 1482—1497.
16. Kuo Y.-H., Reed R. J., and Low-Nam S. Effects of surface energy fluxes during the early development and rapid intensification stages of seven explosive cyclones in the western Atlantic. — Mon. Wea. Rev., 1991, vol. 119, No. 2, pp. 457—476.
17. Laprise R. The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. — Mon. Wea. Rev., 1992, vol. 120, No. 1, pp. 197—207.
18. Lin Y.-L., Farley R. D., and Orville H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. — J. Clim. Appl. Meteorol., 1983, vol. 22, No. 6, pp. 1065—1092.
19. Mlawer E. J., Taubman S. J., Brown P. D., Iacono M. J. and Clough S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM. A validated correlated-k model for the long wave. — J. Geophys. Res., 1997, vol. 102, No. D14, pp. 16663—16682.
20. Skamarock W. C. Timesplitting techniques for multidimensional transport. — [Http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/advect3d-2005.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/advect3d-2005.pdf).
21. WRF ARW Core (2005). — <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>.
22. Yoshida A. and Asuma Y. Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region. — Mon. Wea. Rev., 2004, vol. 132, No. 5, pp. 1121—1142.