

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.576+ 551.521

# Прогноз микрофизических и оптических характеристик крупномасштабной облачности и ее радиационного воздействия с помощью мезомасштабной модели численного прогноза погоды COSMO

М.В. Шатунова<sup>1</sup>, Ю.О. Хлестова<sup>2</sup>, Н.Е. Чубарова<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Гидрометцентр России

123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Поступила в редакцию 30.04.2019 г.

Отражены результаты исследования микро- и макрофизических характеристик облачности и связанных с ней радиационных эффектов по данным оперативной и экспериментальной схем облачно-радиационного взаимодействия мезомасштабной модели COSMO, а также наземных измерений в Метеорологической обсерватории в Линденберге (Германия). Выявлены статистически значимые отклонения прогнозируемых характеристик облачности от данных наблюдений. Установлены вероятные причины отклонений прогноза ледности в верхней тропосфере.

*Ключевые слова:* облачность, солнечная радиация, модель COSMO; cloudiness, solar radiation, COSMO model.

## Введение

В настоящее время тенденция использования мезомасштаба  $\beta$  моделей с шагом расчетной сетки 1–2 км в задачах оперативного численного прогноза погоды (ЧПП) отмечается во всех крупных мировых прогностических центрах [1, 2].

Увеличение пространственного разрешения влечет за собой изменения в описании динамических и физических процессов, определяемых в модели ЧПП. При расчетах на сетке с шагом 1–2 км процессы масштаба свыше 10 км можно описать явным образом, не прибегая к параметризации. Однако многие физические процессы, от мелкой конвекции до микрофизических облачных процессов, сохраняют подсеточный масштаб. В этом случае применяется параметрический подход, который заведомо содержит погрешности (неточности) в описании того или иного процесса.

В моделях ЧПП задачи описания взаимодействия радиации и облачности условно можно разделить на два типа: учет количества облаков и водности облака (в жидкой и твердой фазе); учет микроструктуры облака, а именно формы и размера частиц. Подходы к решению упомянутых вопросов, используемые в модели COSMO, кратко изложены в разд. 2.1.

Описание переноса радиации в мезомасштабной негидростатической модели COSMO [3] построено на дельта-двухпоточковом приближении решения уравнения переноса с разбиением спектра на восемь интервалов и учетом влияния на перенос излучения облаков, аэрозолей, водяного пара и других газов (озона, углекислого газа, кислорода, метана) [4]. Используемый метод хорошо зарекомендовал себя в крупномасштабных моделях ЧПП, будучи достаточно точным и эффективным для вычислений [4].

Мы ставили перед собой задачу оценить подход, применяемый в COSMO для описания взаимодействия радиации и облачности, а также качество воспроизведения моделью с высоким пространственным разрешением характеристик облачности, таких как водность и ледность [5].

## 1. Методология и данные

### 1.1. Определение параметров облачности в модели COSMO

В модели COSMO в расчете параметров облачности «задействованы» несколько (структурных) модельных блоков: динамический, в котором решается уравнение переноса субстанции; микрофизический, в котором определяются источники и стоки за счет микрофизических процессов в облаках; блок расчета турбулентного перемешивания; радиационный блок, в котором определяются оптические параметры облаков и их количество. В качестве прогностической

\* Марина Владимировна Шатунова (gbert@yandex.ru); Юлия Олеговна Хлестова (khlestova2013@yandex.ru); Наталья Евгеньевна Чубарова (natalia.chubarova@gmail.com).

переменной используется удельное содержание (или массовая доля)  $q$  той или иной субстанции. Под субстанцией в данном случае подразумевается вода в жидкой ( $l$ ) или твердой ( $f$ ) фазе. Для простоты изложения мы в дальнейшем будем использовать термины водность и ледность облака, понимая под ними удельное содержание жидкой воды и удельное содержание воды в виде ледяных частиц соответственно.

Крупномасштабная водность/ледность определяется из решения следующего уравнения:

$$\rho \frac{dq^{l,f}}{dt} = -\nabla \cdot (\mathbf{P}^{l,f} + \mathbf{F}^{l,f}) + I^{l,f}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $\mathbf{P}$  – поток осадков;  $\mathbf{F}$  – турбулентный поток;  $I$  – скорость фазовых переходов.

Водность и ледность подсеточной облачности принимается равной 0,5% от удельного содержания водяного пара при насыщении с учетом фазового состояния

$$\begin{aligned} q_l &= 0,005q_s(1-f), \\ q_f &= 0,005q_s f, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $q_s$  – удельное содержание насыщенного водяного пара;  $f$  – доля ледяной фазы в облаке, зависящая от температуры.

Величины крупномасштабной водности и ледности определяют количество крупномасштабной облачности  $N$ : если водность больше нуля или ледность больше  $10^{-7}$  кг/кг, то  $N = 1$ . В противном случае  $N$  принимается равной количеству подсеточной облачности  $N_{\text{sgs}}$ . Количество подсеточной облачности  $N_{\text{sgs}}$  определяется исходя из предположений о распределении влаги внутри ячейки сетки по формуле

$$N_{\text{sgs}} = \max \left\{ 0, \min \left[ 1, \left( \frac{q}{q_s} - \alpha \right) (1 - \alpha)^{-1} \right] \right\}^2, \quad (3)$$

где  $q$  – удельное содержание воды во всех фазах (водяной пар, капли, кристаллы);  $q_s$  – удельное содержание водяного пара при насыщении;  $\alpha = 0,95 - 0,8\sigma(1 - \sigma)(1 + \sqrt{3}(\sigma - 0,5))$ ;  $\sigma$  – отношение давления на расчетном уровне к приземному давлению.

Подход к описанию оптических свойств облачности, изложенный в работе [4], основывается на аппроксимации, связывающей оптические параметры облака с его водностью и эффективным радиусом распределения капель по размерам (далее – эффективный радиус) [6], и связи эффективного радиуса с водностью. Оптическая толщина ( $\tau$ ), альbedo однократного рассеяния ( $\omega$ ) и параметр вытянутости индикатрисы рассеяния ( $g$ ) рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \tau &= \left( c_1 + \frac{c_2}{r_{\text{eff}}} \right) q^l \Delta z, \\ \omega &= c_3 + c_4 r_{\text{eff}}, \\ g &= c_5 + c_6 r_{\text{eff}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $r_{\text{eff}}$  – эффективный радиус;  $q^l$  – удельная водность облака;  $\Delta z$  – вертикальная протяженность облака (толщина, мощность);  $c_1 - c_6$  – постоянные, определенные для каждого из спектральных интервалов.

С учетом того что в оперативной версии модели эффективный радиус явным образом не рассчитывается, было введено соотношение между этим параметром и водностью в виде

$$r_{\text{eff}} = c_7 + c_8 q^l, \quad (5)$$

где  $c_7, c_8$  – постоянные.

Сейчас в модели при расчете оптических параметров величина  $q^l$  в уравнениях (4) и (5) представляет собой суммарное содержание воды в жидкой и твердой фазах.

По оценкам авторов [4], предложенный подход давал удовлетворительное согласие оптических параметров с данными наблюдений. Следует учесть, что в модели на момент внедрения указанного подхода использовались упрощенные методы определения количества и водности облаков, а расчеты велись на достаточно грубой сетке (порядка 40 км).

Недостатки используемого оперативной практике подхода очевидны: учитываются только жидкокапельные частицы, оптические свойства определяются только удельной водностью, для всех типов облаков использована одна функция распределения частиц по размерам и др.

В настоящее время в модель COSMO внедрена новая схема описания взаимодействия радиации и облачности, учитывающая влияние аэрозоля на формирование облачных гидрометеоров. Оптические параметры облачности рассчитываются в зависимости от удельной водности/ледности и эффективного радиуса облачных частиц, который, в свою очередь, рассчитывается исходя из величины удельной водности/ледности и концентрации частиц при заданных параметрах функции распределения частиц по размерам. Для расчета концентрации частиц облака использована схема Сегал–Хаина [7], определяющая связь количества частиц облака с концентрацией ядер конденсации и вертикальной скоростью на нижней границе облака. Новая схема учитывает как капли, так и кристаллы; последние полагаются случайно ориентированными гексагональными призмами, эффективный радиус которых определяется согласно [8, 9].

## 1.2. Данные наблюдений

Оценка прогнозов традиционно выполняется для основных метеорологических параметров: атмосферного давления, температуры, влажности, скорости и направления ветра, баллов облачности. Такой выбор обусловлен наличием регулярных и масштабных данных наблюдений этих параметров. Детальные наблюдения характеристик облачности проводятся главным образом в рамках отдельных исследовательских кампаний или экспериментов. Для решения поставленной нами задачи наиболее ценным является сочетание наблюдений радиационных и облачных

характеристик. Такие комплексные наблюдения проводятся в Метеорологической обсерватории в Линденберге (Германия), где осуществляются радиационные измерения по программе BSRN (Baseline Surface Radiation Network). Данные измерений облачных характеристик этой станции заносятся в архив SAMD (Standardized Atmospheric Measurement Data) [10], созданный в рамках проекта HD(CP)<sup>2</sup> (High Definition Clouds and Precipitation for advancing Climate Prediction).

В настоящей работе для анализа использовались данные наземных измерений комплекса различных приборов и восстановленные из них облачные характеристики с использованием алгоритмов Cloudnet [11] и методики комплексного профилирования IPT (Integrated Profiling Technique), разработанным в Боннском метеорологическом университете [12]. Комбинация различных методов измерений позволяет значительно повысить точность получаемых данных.

Так, общее влаго- и водосодержание рассчитывается по результатам наблюдений микроволнового радиометра. Ледосодержание восстанавливается по данным радарных измерений [13]. Профили жидкой и газообразной влаги в атмосфере и эффективный радиус жидких облачных частиц на основе измерений микроволнового радиометра, облачного радара и облакомера методом комплексного профилирования.

Интегральные величины влаго- и водосодержания атмосферы, а также вертикальный профиль (58 уровней от 0 до 10 км) влажности были получены по результатам наблюдений микроволнового радиометра TP/WVP-3000. Микроволновый радиометр TP/WVP-3000 — это 12-канальный прибор, способный измерять в любых погодных условиях в интервале частот от 22,2 до 58,8 ГГц в пределах полос поглощения водяного пара каждые 20 с. TP/WVP-3000 включает в себя датчики температуры, влажности и давления. Прибор нечувствителен к ледяным частицам. Мощность принятого антенной излучения преобразуется в радиояркостную температуру по закону Планка. Величины радиояркостной температуры, в свою очередь, используются в качестве входных данных для восстановления содержания жидкой и газообразной влаги в атмосфере с учетом поглощающих способностей водяного пара и кислорода [14]. Данные, полученные на основании наблюдений TP/WVP-3000, тестировались по результатам аэрологического зондирования в различных географических регионах от тропических до арктических широт. Точность восстановления величин влаго- и водосодержания составляет 15%.

При проведении сравнения также были использованы данные о компонентах нисходящей солнечной радиации станции сети BSRN, которая отличается наилучшим качеством радиационных измерений. Наблюдения на станции проводятся пиранометром Kipp&Zonen CM21 (суммарная компонента) и пиргелиометром Eppley NIP (прямая компонента), точность измерений которых составляет 10 и 8 Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

Для сопоставления с модельными результатами данные наблюдений усреднялись в 15-минутном ин-

тервале. В работе также использовались данные метеорологических наблюдений (количество и тип облачности, осадки) Метеорологической обсерватории в Линденберге, передаваемые в рамках глобального обмена гидрометеорологической информации и хранящиеся в базе данных Гидрометцентра России.

### 1.3. Конфигурация модели COSMO

Эксперименты были выполнены для области размером 550 × 600 км, центрированной относительно Линденберга, шаг расчетной сетки — 2,2 км. Расчеты проводились на 60 уровнях по вертикали с шагом по времени 20 с, при этом радиационные характеристики рассчитывались с шагом по времени 15 мин. Расчеты выполнялись на 24 ч со стартом от 00:00 ВСВ. Для экспериментов основные настройки динамического и физического блоков модели были аналогичны используемому в оперативной версии COSMO-Ru2 [15, 16], а в качестве начальных и граничных условий были взяты данные глобальной модели ICON [17] (с дискретностью 3 ч).

В ходе экспериментов были выполнены расчеты для периода с 1 марта по 31 октября 2016 г. Чтобы оценить новую схему описания взаимодействия радиации и облачности расчеты выполнялись по стандартной и новой облачно-радиационной схеме для нескольких случаев (дней) 2014 г., для которых имелись данные наблюдений за микрофизическими параметрами облачности.

## 2. Результаты экспериментов

### 2.1. Водосодержание

На рис. 1 приведены величины интегрального влагосодержания по результатам модельных расчетов и по данным измерений (микроволновым радиометром), представленные как «ящик с усами», для периода с марта по октябрь 2016 г. Верхняя и нижняя границы ящика представляют собой 0,25- и 0,75-квантили, линия внутри ящика — медиана, крестиком отмечено среднее арифметическое, а линиями — максимальное и минимальное значения. Как по данным измерений, так и по результатам интегрального влагосодержания подчиняется логнормальному распределению с выраженной асимметрией в сторону больших значений; среднеарифметическое значение значительно превосходит медиану.

В данных измерений прослеживается сезонный ход среднего влагосодержания атмосферы с минимумом в апреле и сентябре и максимумом в июле — августе. Максимальные средние значения интегрального влагосодержания (0,13–0,14 кг/м<sup>2</sup>) в летние месяцы согласуются с климатическими данными по осадкам, максимум которых также приходится на лето. Минимальное среднее значение в апреле (0,07 кг/м<sup>2</sup>) согласуется с минимумом в количестве осадков. Следует отметить, что количество осадков в апреле, июне, июле и октябре 2016 г. было близко к климатической норме. Снижение интегрального

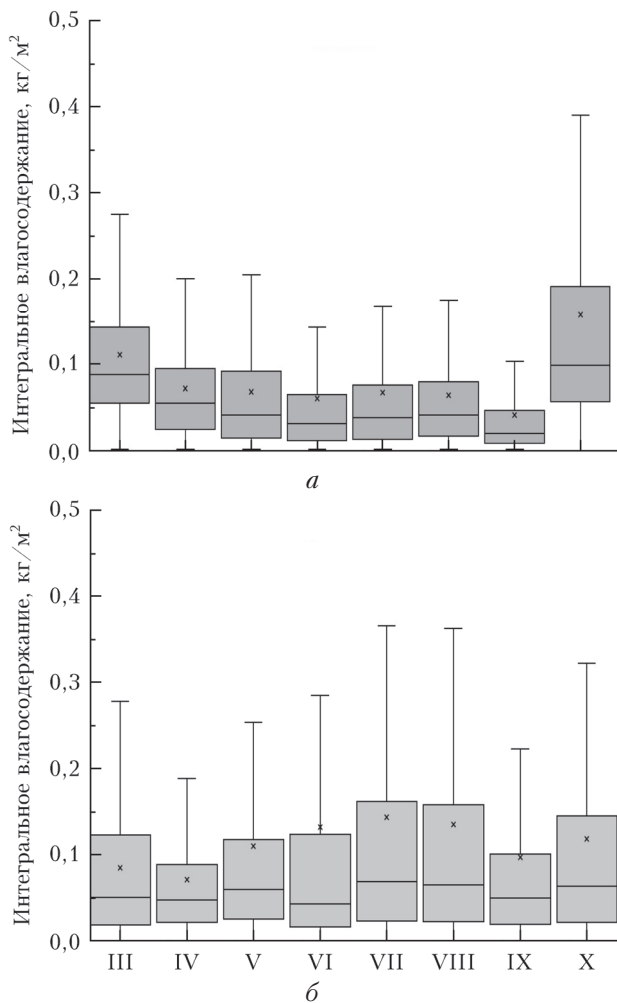


Рис. 1. Сезонный ход интегральных величин водосодержания: *a* – по данным наблюдений; *b* – результатам моделирования (март–октябрь 2016 г.)

водосодержания в сентябре 2016 г. сопровождалось, согласно данным наблюдений, уменьшением количества осадков, которое оказалось в 2–4 раза ниже нормы.

При сравнении результатов моделирования с данными измерений наблюдается статистически значимое занижение моделью величины интегрального водосодержания в летние месяцы и завышение в марте и октябре.

Приведенные выше оценки выполнялись для 15-минутных данных, и сравнения проводились «точка в точку», а не для осредненных по площади величин, из-за чего допустимо наличие временной погрешности. В этом случае корреляция оказалась достаточно низкой, коэффициент детерминации составил 0,1.

При увеличении временного интервала осреднения, т.е. с использованием свойства эргодичности, коэффициент детерминации между измерениями и расчетами увеличивается до 0,37 при суточном осреднении. Модель завышает интегральное водосодержание при малых его значениях, а для величин больше  $0,1 \text{ кг/м}^2$ , наоборот, прослеживается занижение. При осреднении в 3-часовом и 24-часовом временных интервалах прослеживаются те же тенденции соот-

ношения измеренных и рассчитанных значений, однако относительная разность между рассчитанным и измеренными значениями несколько уменьшается.

## 2.2. Ледность облаков

Ледность облаков является важной характеристикой как для расчета оптических параметров облачности, так и для прогноза осадков. В первую очередь это относится к смешанным облакам. Наличие ледяных кристаллов в облаке и их количество определяет эволюцию облака, в частности скорость процесса осадкообразования. С другой стороны, смешанные облака оказываются оптически более прозрачными, чем чисто капельные, при одинаковом суммарном водосодержании. Оценивая ледность, рассчитываемую по модели, мы можем определить источник возможных ошибок в расчете потоков излучения и в расчете осадков.

На рис. 2 приведены медианные значения интегрального ледосодержания для периода март–октябрь 2016 г, а также 0,25- и 0,75-квантили. Рассчитанные значения интегрального ледосодержания оказываются больше наблюдаемых для всего рассматриваемого периода. Наибольшие расхождения

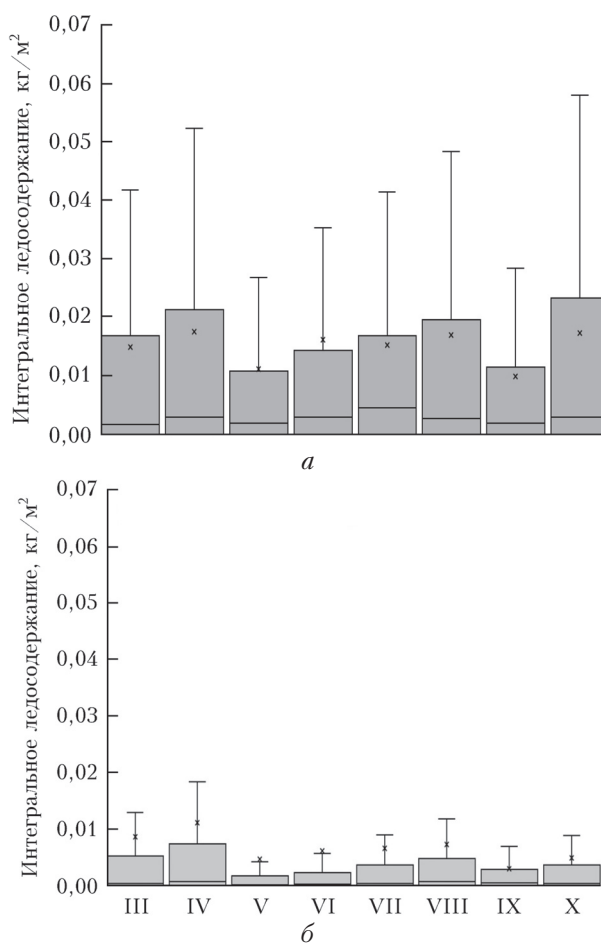


Рис. 2. Сезонный ход интегральных величин ледосодержания: *a* – по данным наблюдений; *b* – результатам моделирования (март–октябрь 2016 г.)

отмечаются в мае и октябре. Сезонный ход по наблюдениям и расчетам оказывается схожим: максимум в апреле, резкое снижение в мае и постепенный рост в летние месяцы с последующим снижением в сентябре. Так же как и в случае с интегральным

водосодержанием, среднее значение распределения превышает медиану на порядок как по данным измерений, так и по расчетам.

На рис. 3 приведены профили средних величин ледности для марта–октября 2016 г. Видно, что

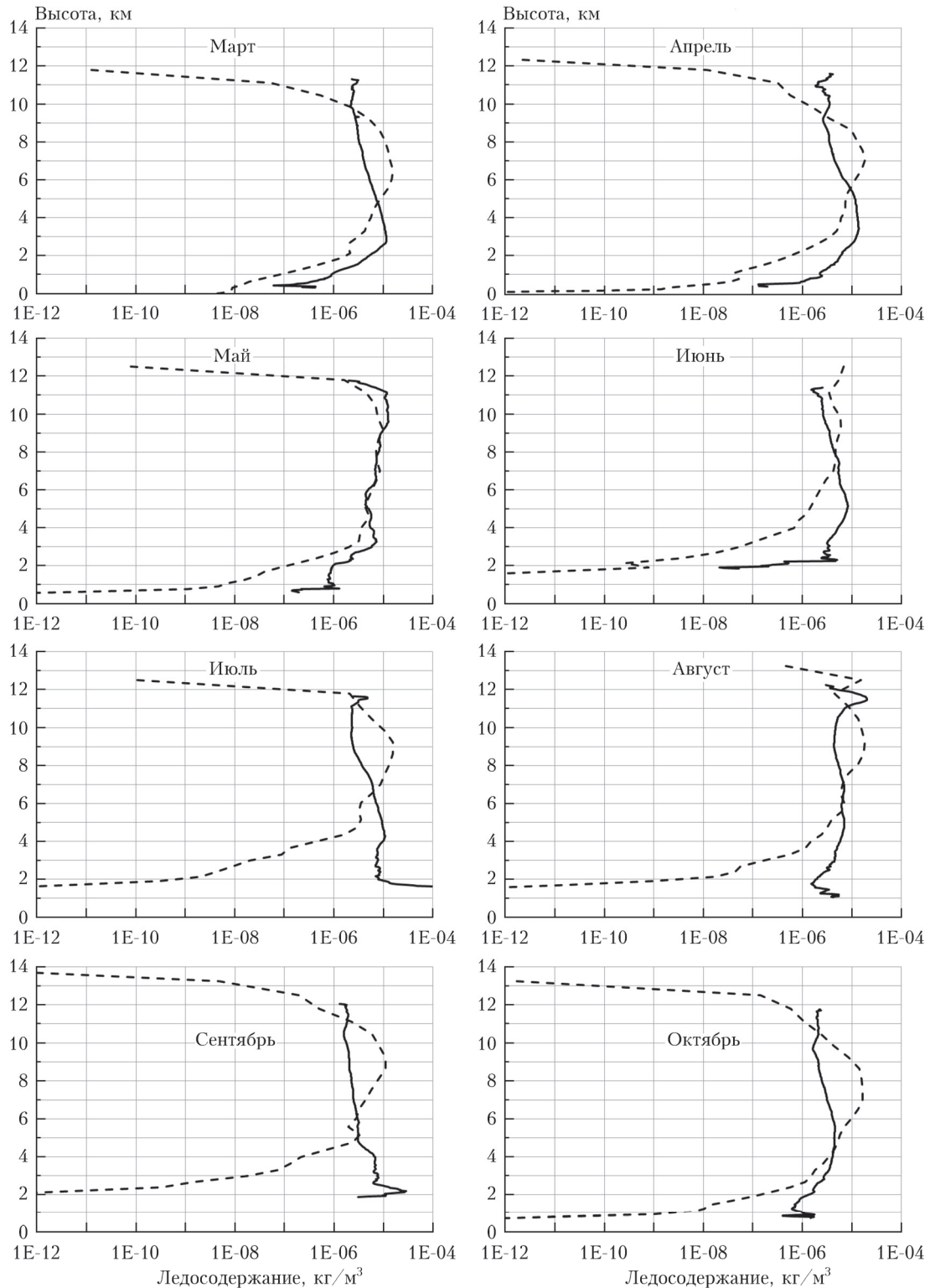


Рис. 3. Вертикальный профиль ледности: сплошная линия – по данным наблюдений; пунктир – по результатам моделирования для марта–октября 2016 г.

модель систематически занижает величину ледности в нижних слоях (до высоты порядка 5 км) и завышает в верхних. Изменение минимальной высоты, на которой прогнозируется наличие ледяных кристаллов, в период с марта по октябрь соответствует наблюдаемому, однако в модели значение этой высоты оказывается несколько больше.

При сопоставлении оценок прогноза ледности с полученными ранее выводами о качестве расчета удельной влажности по модели COSMO видно, что завышение рассчитанных значений ледности в слое 6–12 км может быть связано с завышением влагосодержания в расчете [13].

Можно также предположить, что к ошибкам в расчете ледности приводят и погрешности параметризации, используемые при описании источников и стоков, а также фазовых переходов и процессов осадкообразования.

### 2.3. Характеристики облачности по расчетам с новой облачно-аэрозольной схемой

Оценка микрофизических параметров облака, рассчитанных по модели с новой облачно-радиационной схемой, осложняется недостатком данных наблюдений. Для верификации отбирались случаи, когда при наличии наблюдений за микрофизикой облака отмечалась однослойная сплошная облачность, при этом в модели воспроизводились аналогичные условия. В результате было выбрано пяти таких случаев: 4 и 23 марта, 5 и 18 апреля, 13 сентября. Проводились сопоставления средних по профилю эффективных радиусов жидких облачных частиц за 15-минутные интервалы. По расчетам, величина эффективного радиуса изменялась в пределах 5–6 мкм. При этом мода в 40% случаев приходилась на частицы размером 5–5,2 мкм. По данным наблюдений, средний по профилю эффективный радиус облачных капель был значительно меньше: он варьировался в диапазоне от 2 до 7 мкм. Распределение максимальных по профилю эффективных радиусов, по результатам расчетов, имеет равномерный характер в интервале от 4 до 20 мкм (рис. 4). По данным измерений, распределение максимальных  $R_{eff}$  логнормальное, с модальными значениями в диапазоне от 4 до 6 мкм (порядка 38%). Таким образом, можно говорить, что и средние, и максимальные по профилю эффективные радиусы облачных частиц, полученные по новой схеме модели, характеризуются несколько более высокими значениями по сравнению с измерениями. Однако для получения надежных выводов необходимо провести дополнительные сравнения.

Проанализируем величины интегрального водосодержания по данным расчетов с использованием новой и стандартной схем. Для рассматриваемых дней различия в водосодержании практически не прослеживаются. Согласно новой схеме среднее для рассматриваемых дней водосодержание незначительно выше (порядка  $0,01 \text{ кг/м}^3$ ). Однако сопоставле-

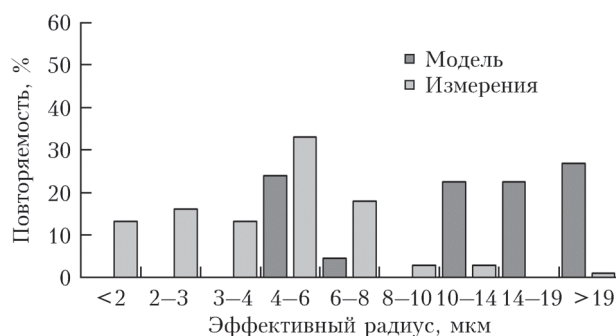


Рис. 4. Распределение максимальных по профилю эффективных радиусов жидких облачных частиц по данным расчетов и измерений,  $N = 92$

ние результатов расчетов с данными измерений выявило занижение моделью интегрального водосодержания в среднем на  $0,12 \text{ кг/м}^3$  по новой схеме и на  $0,13 \text{ кг/м}^3$  по оперативной (стандартной) схеме. В отличие от интегрального водосодержания, ледосодержание по данным новой схемы в 73% случаев ниже, чем по расчетам со стандартной схемой. В среднем занижение составляет порядка 41%.

### 2.4. Радиационные характеристики

На основании модельных расчетов и измерений получена выраженная нелинейная связь суммарной радиации у поверхности Земли с величиной интегрального водосодержания. Расхождение рассчитанных и измеренных значений интегрального водосодержания приводит к большим различиям между расчетами суммарной радиации и измерениями. На рис. 5 представлены относительные погрешности моделируемой ( $m$ ) суммарной радиации и измеренной ( $i$ ) ( $Q(m)/Q(i)$ , %) как функция относительной погрешности интегрального водосодержания

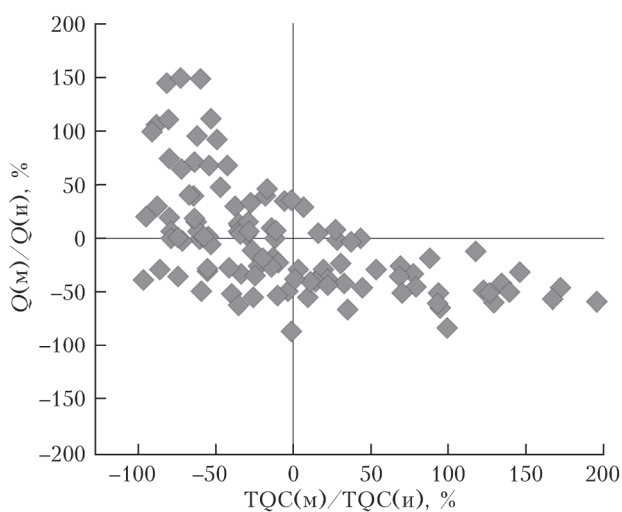


Рис. 5. Относительные погрешности расчета суммарной радиации ( $Q(m)/Q(i)$ , %) в зависимости от относительной погрешности интегрального водосодержания ( $TQC(m)/TQC(i)$ , %)

( $TQC(M)/TQC(N)$ , %). Хорошо видно, что при удовлетворительном соотношении модельных и измеренных значений водосодержания наблюдается согласие в расчете суммарной радиации, а при недооценке интегрального водосодержания в модели наблюдается закономерное завышение солнечной радиации и наоборот.

Сопоставления расчетов суммарной солнечной радиации у поверхности Земли, выполненных по новой схеме, показало, что за счет более низкого водосодержания модельные значения заметно ниже по данным измерений. При этом по новой схеме в 90% случаев ошибка расчета суммарной радиации по модулю не превышает  $100 \text{ Вт/м}^2$ , в то время как по стандартной схеме эта величина достигает  $300 \text{ Вт/м}^2$ . Результаты, полученные с применением новой схемы лучше согласуются с данными измерений. Однако вследствие небольшой статистики эти результаты можно считать предварительными.

### Заключение

Наличие данных наблюдений позволило провести детальную оценку водо- и ледосодержания атмосферы, рассчитанных с помощью мезомасштабной модели атмосферы COSMO.

Проведенные исследования дали возможность оценить качество расчета величин водо- и ледосодержания атмосферы в стандартной и новой схеме расчета. Проведенный анализ выявил значительные отклонения в сезонном ходе рассчитанного по модели вертикального распределения ледности по сравнению с данными наблюдений. Завышение ледности в слое 6–12 км может быть связано с ошибками в расчете величины удельного влагосодержания. Эти погрешности могут приводить к ошибкам потоков длинноволновой радиации.

Получено некоторое завышение рассчитанных величин эффективного радиуса облачных частиц по сравнению с данными измерений.

Результаты расчетов по новой схеме облачно-радиационного взаимодействия показали лучшее качество восстановления суммарной радиации по сравнению со стандартным алгоритмом. Однако требуется проведение большего числа экспериментов с привлечением данных наблюдений по микрофизике облаков для получения статистически значимых оценок.

Работы выполнены при финансовой поддержке РНФ (грант № 18-17-00149).

1. URL: <http://wgne.meteoinfo.ru/nwp-systems-wgne-table/wgne-table/> (last access: 30.03.2019).
2. Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б. Технологии метеорологического прогнозирования в Российской Федерации: состояние и перспективы // Тр. VII Всерос. метеорологич. съезда. СПб.: Д'Арт, 2015. С. 32–42.
3. URL: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (last access: 30.03.2019).
4. Ritter B., Geleyn J.-F. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations // Mon. Weather. Rev. 1992. V. 120. P. 303–325.

5. Chubarova N., Khlestova J., Shatunova M., Platonov V., Rivin G., Gorsdorf U., Becker R. Cloud characteristics and cloud radiative effects according to COSMO mesoscale model and measurements // Proc. SPIE. 24th Intern. Sympos. Atmos. Ocean Opt.: Atmos. Phys. V. 10833. P. 108331N-1–8.
6. Slingo J.M., Shrecker H.M. On the shortwave radiative properties of water clouds // J. Atmos. Sci. 1982. V. 46. P. 1419–1427.
7. Segal Y., Khain A. Dependence of droplet concentration on aerosol conditions in different cloud types: Application to droplet concentration parameterization of aerosol conditions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N D15204. DOI: 10.1029/2005JD006561.
8. Key J.R., Yang P., Baum B.A., Nasiri S.L. Parameterization of shortwave ice cloud optical properties for various particle habits // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N D13. P. 4181–4190.
9. Fu Q., Yang P., Sun W.B. An accurate parameterization of the infrared radiative properties of Cirrus clouds for climate models // J. Climate. 1998. V. 11, N 9. P. 2223–2237.
10. URL: <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=samd> (last access: 30.03.2019).
11. Illingworth A.J., Hogan R.J., O'Connor E.J., Bouniol D., Brooks M.E., Delanoë J., Denovan D.P., Eastment J.D., Gaussiat N., Goddard J.W.F., Heffelin M., Klein-Baltink H., Krasnov O.A., Pelon J., Piriou J.-M., Protat A., Russchenberg H.W.J., Seifert A., Tompkins A.M., van Zadelhoff G.-J., Vinit F., Willén U., Wrench C.L. Cloudnet – continuous evaluation of cloud profiles in seven operational models using ground-based observations // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2007. N 88. P. 883–898.
12. Lohmert U., van Meijgaard E., Baltink H.K., Groß S., Boers R. Accuracy assessment of an integrated profiling technique for operationally deriving profiles of temperature, humidity and cloud liquid water // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, N D04205. DOI: 10.1029/2006JD007379.
13. Hogan R.J., Mittermaier M.P., Illingworth A.J. The retrieval of ice water content from radar reflectivity factor and temperature and its use in evaluating a mesoscale model // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2006. N 45. P. 301–317.
14. Ware R., Carpenter R., Guldner J., Liljegren J., Nehrkorn T., Solheim F., Vandenberghe F. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid // Radio Science. 2003. V. 38, N 4. P. 8079. DOI: 10.1029/2002RS002856.
15. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Курсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорол. и гидрол. 2015. № 6. С. 58–70.
16. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В., Курсанов А.А., Кузьмина Е.В., Шатунова М.В., Чумаков М.М., Алферов Д.Ю., Бундель А.Ю., Зайченко М.Ю., Никитин М.А. Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. № 44. С. 25–55.

17. Zangl G., Reonert D., Ripodas P., Baldaud M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-

hydrostatic dynamical core // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 2014. V. 144, N 687. P. 563–579. DOI: doi.org/10.1002/qj.2378.

*M.V. Shatunova, Yu.O. Khlestova, N.E. Chubarova.* **Forecast of microphysical and optical characteristics of grid-scale clouds and its radiative effect with the mesoscale weather prediction COSMO model.**

The article is devoted to the study of micro- and macrophysical characteristics of clouds and radiative effect according to the operational and experimental schemes of cloud-radiation interaction of the COSMO mesoscale model and ground-based measurements at the Meteorological Observatory in Lindenberg (Germany). Statistically significant deviations of the model cloud characteristics from the measurements are found. The probable reasons of ice cloud water content deviations in the upper troposphere are determined.