

УДК 551.509 + 551.510.42

Паламарчук Ю. О.

Одесский государственный экологический университет

АТМОСФЕРНЫЕ АЭРОЗОЛИ: ИСТОЧНИКИ, ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИЧЕСКУЮ ПОГОДУ, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ключевые слова: аэрозоли, модель HARMONIE, мезомасштабные ячейки

Введение. Значительный прогресс вычислительных технологий и расширение перечня наблюдаемых физических и химических величин измерительными системами, как дистанционными, так и *in situ*, послужили толчком для углубленного изучения роли и влияния аэрозолей на состояние атмосферы. Факт присутствия мелких взвешенных частиц (аэрозолей) в воздухе давно уже ни у кого не вызывает сомнений, но влияние этих частиц в зависимости от их происхождения и эволюции на протекающие атмосферные процессы не всегда однозначно и до конца понятно.

Будучи неотъемлемой составляющей облачных структур, а также существуя вне облаков, аэрозоли в различной степени участвуют в формировании погодных условий на временных масштабах от минут до десятилетий. Традиционно, в климатических моделях аэрозоли принято рассматривать в качестве фактора, провоцирующего смещение общего радиационного баланса в сторону отрицательных значений. Другими словами, аэрозольные частицы, отражая проходящую солнечную радиацию, оказывают эффект охлаждения в глобальном масштабе. Как отмечается в последнем отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1], установление роли аэрозолей антропогенного происхождения и их взаимодействие с облаками сохраняет высокую степень погрешности, что вносит преобладающий вклад в неопределенности общего глобального антропогенного влияния. Наряду с этим, все большее внимание уделяется исследованию эффектов аэрозолей в задачах кратко- и среднесрочных прогнозов погоды, особенно при расчетах осадков.

В последнее время, в численном моделировании акценты сместились в направлении моделирования взаимодействия аэрозолей и облаков, которое изменяет условия формирования осадков (прямые и обратные связи) [2]. В большинстве задач, связанных с моделированием облачности, простые схемы параметризации микрофизических процессов с фиксированными параметрами для облачных ядер конденсации заменяются на более детальные схемы. Наблюдается четкая тенденция к использованию более сложных и интерактивных микрофизических схем описания облачности с возможностью включения информации об аэрозолях. Прогресс в описании микрофизических схем параметризации свойств ледовых кристаллов в облаках, их инициализации и роста привели к значительному улучшению моделирования свойств «холодных» облаков и облаков смешанного типа. Тем не менее, сохраняются неопределенности при предвычислении концентрации количества ледовых кристаллов и оценке влияния аэрозольных частиц на формирование льда в облаках.

В представленной работе обобщены последние достижения в области исследования атмосферных аэрозолей. Выделены ключевые аспекты образования и эволюции аэрозолей, их влияния на физические характеристики атмосферы и особенности описания в существующих системах численного прогноза погоды. Анализ результатов численных экспериментов с европейской

мезомасштабной моделью HARMONIE подтверждает важность и необходимость учета эффектов аэрозолей при решении задач прогноза погоды.

Цель данной работы: оценка роли аэрозолей в атмосферных процессах, в целом, и их влиянии на микрофизические процессы, при формировании погодных условий.

Методом исследования является численное моделирование на основе европейской мезомасштабной модели HARMONIE и анализ разностей метеорологических полей при включении и исключении аэрозолей.

Материалами для данного исследования послужили результаты численных экспериментов с моделью HARMONIE, полученные в формате grib в виде трехмерных распределений для более сотни атмосферных переменных с горизонтальным разрешением 25 км, 65 уровнями по вертикали и дискретностью вывода 3 часа.

Состояние исследований. Аэрозоли, в широком понимании, затрагивают различные сферы жизнедеятельности человека и поэтому зачастую выступают ключевым фактором во многих областях исследований, начиная с измерительных систем и заканчивая прогнозированием, внедрением в практику новых знаний и пересмотром предшествующих основополагающих теорий.

Сложность и актуальность проблемы аэрозолей привела к созданию Европейской аэрозольной ассамблеи (the European Aerosol Assembly, EAA), которая объединяет двенадцать национальных аэрозольных сообществ (НАС) европейских государств (<http://www.gaef.de/eaal/>). Главными задачами и целями ЕАА являются: проведение рабочих совещаний по координации сотрудничества НАС; выработка общей стратегии исследований по аэрозолям; координация времени проведения национальных встреч; поиск точек соприкосновения с другими организациями; содействие обмену информацией в среде европейских сообществ; поддержка развития образования в области наук об аэрозолях; создание рабочих групп специалистов; консолидация усилий в продвижении исследований в области науки и техники касающихся аэрозолей.

Природа и механизмы влияния аэрозолей на атмосферу. Аэрозоли представляют собой твердые или жидкие частицы, взвешенные в воздухе. Первичные аэрозоли попадают в атмосферу из источников, вторичные аэрозоли формируются уже непосредственно в атмосфере. Характеристики аэрозолей описываются их пространственным распределением, распределением массы и составом. В зависимости от источника различают аэрозоли природного и антропогенного происхождения. Так, например, первичными аэрозолями естественного происхождения считаются пыль, продукты сгорания при лесных пожарах, морские брызги, первичные биологические частицы (например, споры). К вторичным аэрозолям относятся аммиак и продукты его распада, диметилсульфид и сульфид, окислы азота и нитраты, летучие органические соединения и вторичные органические аэрозоли.

В большинстве случаев прямой эффект аэрозолей сказывается на изменениях в радиационных потоках и эволюции осадков. Однако, присутствие различных типов аэрозолей в атмосфере оказывает и другие эффекты на состояние погоды и климата. К таким эффектам относятся внутренние обратные связи (*self-feedback effect*), фотохимический эффект, факельный эффект (*smudgepot effect*), влияние на устойчивость атмосферы в дневное время суток, изменение альbedo, влияние на крупномасштабные метеорологические процессы, не прямой и полупрямой эффекты аэрозолей, положительный радиационный отклик на присутствие черного углерода (сажи) в облаках нижнего яруса [3].

Исходя из глобальных оценок, выраженных в терминах изменений радиационного баланса на верхней границе атмосферы и у поверхности земли, а также глобальных средних осадков на поверхности, определены следующие эффекты и пути влияния аэрозолей [4]. Непрямой эффект аэрозолей на альбедо всех типов облачности с фиксированным содержанием воды (*Twomey-effect*) заключается в том, что многочисленные более мелкие частицы облаков отражают больше солнечной радиации по сравнению с таким же количеством влаги, содержащимся в крупных частицах. В результате радиационный баланс на верхней границе атмосферы (F_{TOA}) и у земной поверхности (F_{SFC}) изменяется от -0,5 до -1,9 Вт/м². Непрямой эффект аэрозолей на все типы облачности с меняющимся содержанием воды (эффект продолжительности существования облачности) состоит в том, что мелкие частицы облачности уменьшают продуктивность осадков, продлевая таким образом время существования облачности. Этот эффект сокращает радиационный бюджет у поверхности земли и на верхней границе атмосферы от -0,3 до -1,4 Вт/м², тогда как среднее количество осадков уменьшается. Полупрямой эффект аэрозолей оказывает воздействие на все виды облачности. Он выражается в поглощении солнечной радиации частицами сажи, что провоцирует испарение капель в облаках. Количество осадков при этом уменьшается, радиационный баланс на верхней границе атмосферы изменяется в пределах от +0,1 до -0,5 Вт/м², а у поверхности земли изменение незначительное. Термодинамический эффект в облаках со смешанной фазой выражается в задержке начала замерзания мелких облачных капель. Оценок того, как этот эффект отражается на балансе радиации нет, а глобальное среднее количество осадков может как уменьшаться, так и увеличиваться. Непрямой эффект оледенения (*гляциации*) в облаках со смешанной фазой состоит в увеличении продуктивности осадков посредством большего количества ядер льдообразования. Количество осадков в среднем по земному шару возрастает, а оценки влияния на радиационный баланс F_{TOA} и F_{SFC} отсутствуют. На облаках смешанной фазы сказывается и не прямой эффект заиндевания, когда меньшие облачные капли уменьшают продуктивность. В энергетическом балансе подстилающей поверхности отмечается уменьшение суммарной солнечной радиации от -1,8 до -4,0 Вт/м² из-за увеличения аэрозолей и оптической толщины облачности (для всех типов облачности). При этом среднее количество осадков в целом также уменьшается.

Облачные ядра конденсации (ОЯК) являются подмножеством всех аэрозолей, присутствующих в атмосфере [1]. Большинство загрязняющих аэрозолей, превышающих определенный пороговый размер, являются эффективными облачными ядрами конденсации (например, сульфаты, нитраты и некоторые органические аэрозоли). Многие частицы, которые первоначально представляют собой малоэффективные ОЯК, становятся эффективными вследствие различных химических реакций в газообразной и жидкой фазе, происходящих при их поступлении в атмосферу, в особенности в облаках. Количество сформировавшихся облачных капель зависит от свойств аэрозоля и интенсивности восходящих потоков. Для определенного аэрозоля более сильные восходящие потоки усиливают перенасыщение, что ведет к активированию большей доли аэрозолей. Измерения и результаты численного моделирования показывают, что увеличение концентраций ОЯК (от загрязнений или из естественных источников) провоцирует увеличение концентраций облачных капель.

Измерения характеристик облаков в очагах горения биомассы отмечают бoльшие концентрации капель, более узкий спектр размеров капель и более медленное развитие начальной стадии осадков.

Наличие аэрозольных частиц увеличивает концентрацию облачных капель и уменьшает эффективный размер капель. Высокая плотность популяции ядер инициализирует рост коалесценции (слияния) ядер, ускоряет формирование дождевых капель, увеличивает продолжительность существования облачности и задерживает выпадение осадков [5]. Однако, второй непрямым эффектом аэрозолей достаточно сложно различим, несмотря на привлечение спутниковой информации, метеорологических радаров и наземных наблюдений за аэрозолями [6].

Описание аэрозолей в моделях. В численных моделях влияние аэрозолей подразделяется на изменение радиационных свойств атмосферы и на микрофизические преобразования в облаках. Поскольку характерные размеры аэрозольных частиц значительно меньше пространственного разрешения модельных сеток, в особенности глобальных климатических моделей, то численное описание связанных с ними микрофизических процессов возможно только путем упрощенного их вычисления (параметризации). Современные моделирующие системы состоят из секционного представления распределения аэрозолей по размерам с пакетами декомпозиции химического равновесия для органических и неорганических частиц. В такие пакеты включены все главные микрофизические процессы (образование ядер, коагуляция, конденсация, влажное и сухое осаждение), а также схемы формирования естественных и антропогенных вторичных органических аэрозолей. Описание и учет аэрозолей в моделях в значительной мере осложняется из-за необходимости описания реакций в различных фазовых состояниях (газообразное, жидкое) и поверхностные реакции.

Модели рассматривают следующие типы аэрозолей: морская соль, пыль, элементарный углерод, органический углерод, сульфат, нитрат, аммиак, вторичные органические аэрозоли биологического и антропогенного происхождения. Различные подходы могут быть разделены в зависимости от того, как представлено распределение по размерам (гранулометрическому составу) и какая микрофизика аэрозолей включена в моделирующую систему. Методы описания аэрозолей в зависимости от распределения по размерам можно разделить на три категории: массовые (*bulk schemes*), модальные (*modal schemes*) и секционные схемы (*sectional schemes*). Однако во всех этих методах возникает существенное ограничение, связанное с недостаточной информацией о химическом и гранулометрическом составе выбросов [7].

В массовых схемах, как правило, моделируется общая масса взвешенных частиц или масса частиц из определенного интервала размеров (или нескольких не влияющих друг на друга интервалов). Типичный выбор интервалов состоит из одного или комбинации нескольких размеров 1,0 мкм (μm), 2,5 мкм, 10 мкм и общей массы взвешенных частиц. С вычислительной точки зрения такой подход эффективен, но имеет ограничения в случаях, когда важно учитывать процессы, зависящие от различных размеров частиц.

В модальных схемах распределение аэрозолей по размерам представляется небольшим числом мод (категорий размеров), свойства которых описываются в моделях как функции времени и местоположения. Для этого задается определенная форма моды (например, логарифмически нормальная). Этот подход по вычислительным затратам более дорогостоящий по сравнению с массовыми схемами. Применение модальных схем ограничено в случае

необходимости учета формирования новых частиц. Дополнительной задачей в таких схемах становится предварительное задание диапазонов для размеров и состава частиц между модами.

В секционных схемах распределение по размерам аппроксимируется большим количеством дискретных блоков (*discrete bins*). Модели содержат уравнения для концентраций частиц и химического состава, которые решаются для каждого блока. Данный тип схем является наиболее точным и гибким, но при этом и наиболее дорогостоящим с точки зрения вычислительных затрат.

В массовых схемах осаждение не включает зависимость от размера частиц. Конденсация/испарение определяется равновесием между газообразной и твердой фазами с применением химического баланса термодинамических уравнений. В секционных и модальных схемах все вышеупомянутые микрофизические процессы воспроизводятся детально, что особенно важно для учета распределения концентраций частиц или распределения по химическому составу как функций от размера.

Отсутствие на сегодняшний день единого мнения относительно степени необходимости учета аэрозольных химических и микрофизических процессов, и их эффектов при вычислении прогноза погоды и климата свидетельствует об актуальности данного вопроса и необходимости дальнейших разработок в этом направлении.

Постановка численных экспериментов и анализ полученных результатов. Для выявления и оценки влияния эффектов аэрозолей на прогноз погоды выполнялись численные эксперименты с мезомасштабной моделью HARMONIE. Данная моделирующая система является результатом совместных разработок в рамках программы HIRLAM-B с участием партнеров из ECMWF, Meteo-France и консорциума ALADIN. Модель по умолчанию настроена как мезомасштабная прогностическая система с включением AROME пакета описания физики, 3-х мерным вариационным усвоением данных (3DVAR), объективным анализом полей подстилающей поверхности (CANARI), расчетом процессов на подстилающей поверхности (SURFEX). Модельная сетка допускает задание горизонтального разрешения до 1 км и имеет 65 уровней по вертикали (гибридная система координат).

В работе численные эксперименты выполнялись для периода 11-16 августа 2010 года над областью, покрывающей Северную Атлантику, Европу и северную Африку с разрешением 25 км (450 x 360 узлов). Продолжительность прогноза составляла 120 часов с шагом во времени 2 минуты. Расчеты выполнялись в негидростатической моде, без усвоения данных, с использованием пакетов параметризации физики ALARO и подстилающей поверхности SURFEX. Начальные и граничные условия передавались из глобальной спектральной модели ECMWF-IFS (интегрированная прогностическая система Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды). Обновление на границах области осуществлялось каждые 3 часа. Климатологическое распределение аэрозолей (интегрированная по вертикали оптическая плотность частиц размером 0,550 мкм) задавалось в модели для следующих 6 типов аэрозолей: органические частицы суши природного происхождения, морская соль, пыль пустынь, сажа, вулканические аэрозоли и стратосферные сульфаты, плюс распределение озона. В процессе расчетов эффект аэрозолей в модели предвычислялся в блоках, описывающих микрофизику и радиационные преобразования в атмосфере.

Для установления влияния аэрозолей на физические характеристики атмосферы выполнено два типа экспериментов: с «выключением» и «включением» аэрозолей. В первом случае концентрации всех аэрозолей

задавались нулевыми. Во втором использовались климатологические значения концентраций аэрозолей. В последующем анализировались разности между прогностическими значениями температуры, влажности и осадков, полученные при «чистой» (без аэрозолей) и «загрязненной» (со стандартными концентрациями) атмосфере (рис.1, 2).

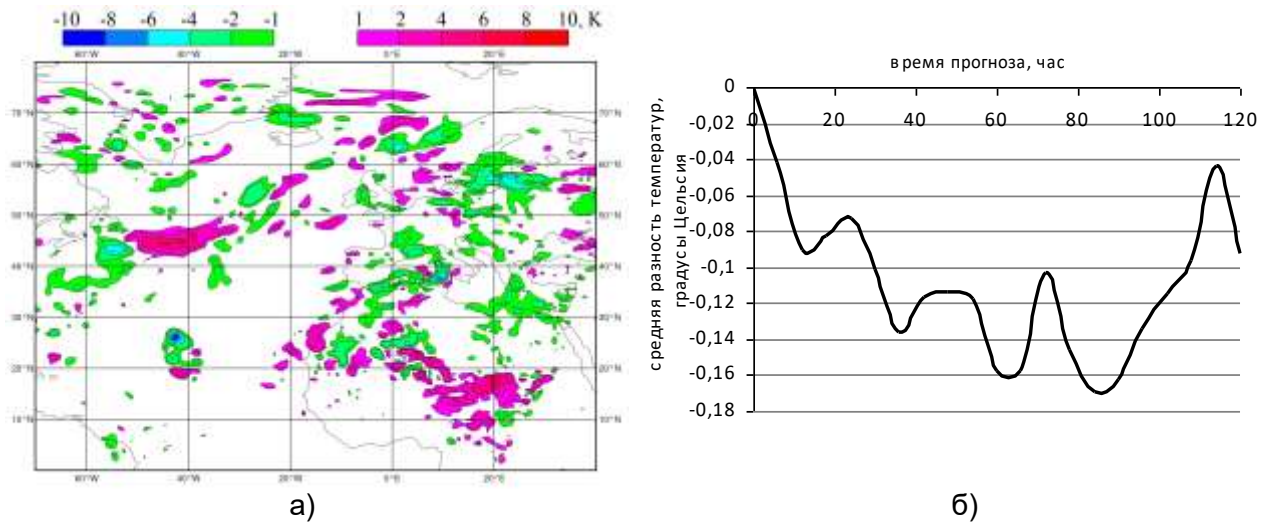
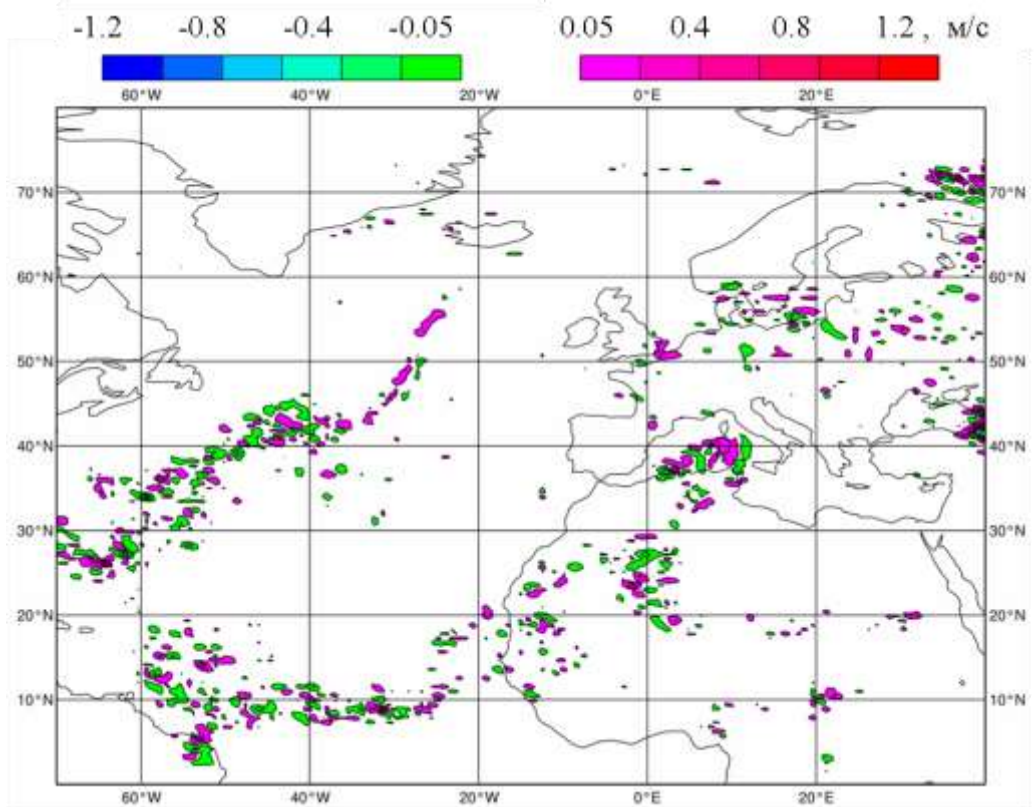


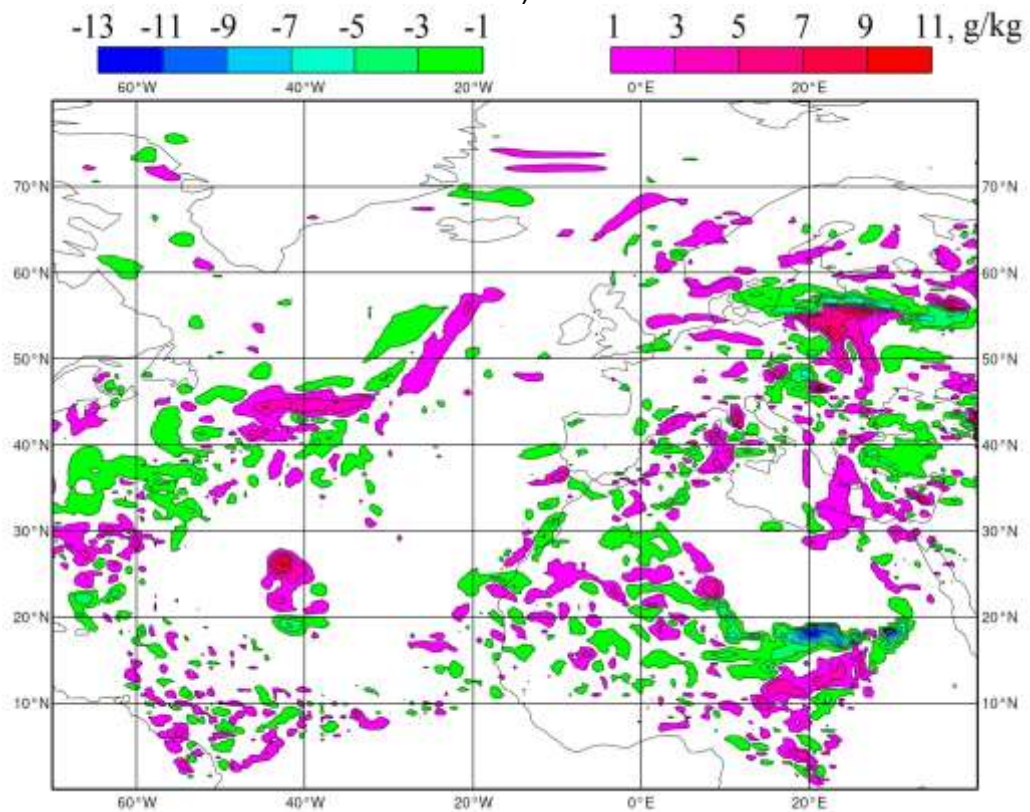
Рис. 1 – Пространственное распределение (а) и эволюция средней по области (б) разности температур (прогноз без аэрозолей минус прогноз с аэрозолями) на уровне 925 гПа через 120 часов интегрирования.

Согласно полученным результатам, после пяти дней интегрирования модели разница в полях температуры двух экспериментов в зависимости от географического региона достигала величины в несколько градусов (рис.1). При этом, пространственное распределение таких различий имеет формы чередующихся мезомасштабных ячеек противоположных знаков. Вероятной причиной обширных областей, покрытых ячейками с отрицательным знаком (прогноз без аэрозолей минус прогноз с аэрозолями) над севером Африки может быть наличие твердых частиц пустыни, которые способствуют нагреванию нижних слоев атмосферы. В дневное время суток аэрозоли, поглощая солнечную радиацию, приводят к локальному нагреванию, последующему формированию температурных инверсий и устойчивой стратификации. Это в свою очередь подавляет развитие конвекции (рис.2а).

Средние по модельной области различия со знаком минус в полях влажности (рис.2а) и осадках у поверхности земли в значительной мере зависят от местоположения и, как и следовало ожидать, наиболее значимы на границах взаимодействия различных по своим свойствам воздушных масс. Аэрозольные частицы выступают дополнительными ядрами конденсации, за счет чего продлевается время существования облаков, задерживается момент выпадения осадков и изменяется их количество. Кроме того, результаты выполненных экспериментов подтвердили и уточнили известный эффект аэрозолей на генерацию, интенсивность развития и изменение времени существования облачности нижнего яруса, а также показали важную роль аэрозолей в формировании и эволюции облачности среднего и верхнего ярусов. Подробное описание таких взаимосвязей буден представлено в последующих работах.



а)



б)

Рис. 2 – То же, что и на рис.1а, но для вертикальной скорости (а) и удельной влажности (б).

Выводы. Учет аэрозолей важен для корректного оценивания изменений глобального климата и прогноза текущей погоды. Их присутствие непосредственно сказывается на радиационном балансе Земли за счет поглощения и отражения прямой солнечной радиации, и, в меньшей степени, через изменение профиля инфракрасного поглощения в атмосфере. Выступая в роли облачных ядер конденсации и ядер льдообразования они влияют на микрофизические процессы в облаках и их радиационные свойства, а также на формирование осадков, в том числе, через альбедо облаков и вторичное излучение. Это, в свою очередь, приводит к изменениям в локальном радиационном балансе, вертикальных профилях температуры в атмосфере, равномерности прогрева подстилающей поверхности.

Основные проблемы учета аэрозолей в численных моделях связаны со следующими факторами: происхождение аэрозолей из различных источников; широкий спектр их распределения по размерам (от десятых долей микрометра до десятков и сотен микрометров); пространственная изменчивость концентраций в атмосфере и различное время жизни (от минут до нескольких недель).

Численные эксперименты с мезомасштабной моделирующей системой HARMONIE подтверждают важность учета эффектов аэрозолей в диагностических и прогностических расчетах состояния атмосферы. Модельное описание состояния атмосферы без влияния основных аэрозолей на микрофизические и радиационные процессы выражается в недооценке приземных температур до нескольких градусов, в отдельных мезомасштабных ячейках до 10 градусов, искажении полей удельной влажности до $\pm 5-14$ г/кг через 120 часов интегрирования, а также изменении скоростей вертикальных движений атмосферы, при этом наблюдается тесная взаимосвязь между термическими и микрофизическими процессами в атмосфере, с одной стороны, и динамические особенности потока, с другой. Последнее проявляется в форме мезомасштабных ячеек различной интенсивности и размера в зависимости от высоты и географического региона.

Перспективы и дальнейшее развитие исследований заключаются в использовании данных аэрозольных наблюдений для формирования начальных условий модели и верификации результатов. Кроме того, предполагается отследить с подробным временным шагом количественные характеристики микрофизических и радиационных преобразований в пределах мезомасштабных ячеек для установления деталей и особенностей жизненного цикла последних.

Автор выражает искреннюю благодарность А. А. Бакланову (Датский метеорологический институт/WMO) за возможность использования вычислительных ресурсов ECMWF при реализации численных экспериментов, **С. В. Иванову** (Одесский государственный экологический университет) за полезные дискуссии, практические рекомендации и техническую поддержку при работе на суперкомпьютере ECMWF. Поддержка **А. В. Павловой** с графическим пакетом Metview позволили существенно ускорить обработку результатов экспериментов.

Список литературы

1. IPCC 2013: Technical Summary. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K. and oth. – Cambridge, UK and NY : Cambridge University Press, 2013. – 222 p. 2. Reexamination of the state of the art of cloud modelling shows real improvements / Muhlbauer A., Grabowski W. W., Malinowski S. P. and oth. // Meeting Summaries ; [American Meteorological Society]. – 2013. doi:10.1175/BAMS-D-12-00188.1 3. Jacobson M. Atmospheric pollution: history, science and regulation / M.

Jacobson. – Cambridge, UK and NY : Cambridge University Press, 2002. – 399 p. **4.** Lohmann U. Global indirect aerosol effects: a review / Lohmann U. and Feichter J. // Atmospheric Chemistry and Physics – 2005. – V.5. – P.715-737. **5.** Levin Z. Aerosol pollution impact on precipitation / Z. Levin, W. R. Cotton. – Springer Science & Business Media, 2008. –407 p. **6.** A study of how aerosols affect low-level clouds over the Nordic Countries using MODIS, ground-based, ECMWF and weather radar data / [Sporre M. K., Swietlicki E., Glantz P., Kulmala M.] // Geophys. Res. Abstracts. – 2012. – Vol.14. – EGU2012-7983. **7.** A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe / Kukkonen J., Olsson T., Schultz D. M. and oth. // Atmos. Chem. Phys., 2012. – 12, 1– 87, doi:10.5194/acp-12-1-2012.

Паламарчук Ю. О. Атмосферні аерозолі: джерела, вплив на фізичну погоду, моделювання. Виконано аналіз ролі аерозолів в атмосфері, зокрема при розвитку мікрофізичних процесів і формуванні погодних умов. Порівняння результатів чисельних експериментів з мезомасштабною моделлю HARMONIE при наявності аерозолів і за їх відсутності дало змогу встановити їх вплив на термічні і мікрофізичні характеристики атмосфери, а через них і на динамічні особливості потоку. Зміни в характеристиках атмосфери проявляються в формі мезомасштабних осередків, що розвиваються в нижній і середній тропосфері. Ступінь впливу кожного з типу аерозолів залежить від висоти і географічного регіону.

Ключові слова: аерозолі, модель HARMONIE, мезомасштабні осередки.

Palamarchuk J. O. Atmospheric aerosols: the sources, impact on the physical weather, modelling. The role of aerosols in atmosphere, in particular in microphysical processes and weather conditions formation is analyzed. The inter-comparison of results from two numerical experiments with mesoscale HARMONIE model at presence and absence of aerosols revealed their influence on the microphysical and thermal processes with following influence on dynamical features of the atmospheric flow. Changes in the atmospheric state appeared as mesoscale cells developing at the low and middle troposphere. The impact from each aerosol type depends on the altitude and geographical region.

Keywords: aerosols, HARMONIE model, mesoscale cells.

Паламарчук Ю. О. Атмосферные аэрозоли: источники, влияние на физическую погоду, моделирование. Выполнен анализ роли аэрозолей в атмосфере в частности, при развитии микрофизических процессов, и формировании погодных условий. Сравнение результатов численных экспериментов в мезомасштабной модели HARMONIE при наличии и отсутствии аэрозолей позволило установить их влияние на термические и микрофизические характеристики атмосферы, а через них, на динамические особенности потока. Изменения характеристик атмосферы проявляются в форме мезомасштабных ячеек, развивающихся в нижней и средней тропосфере. Степень влияния каждого типа аэрозолей зависит от высоты и географического региона.

Ключевые слова: аэрозоли, модель HARMONIE, мезомасштабные ячейки.

Надійшла до редколегії 05.05.2015

УДК 551.555.9

Прокоф'єв О. М.

Одеський державний екологічний університет

БАГАТОРІЧНА МІНЛИВІСТЬ ПРИЗЕМНОЇ ШВИДКОСТІ ВІТРУ У СХІДНІЙ АНТАРКТИДІ

Ключові слова: швидкість вітру, Східна Антарктида, аномалія

Постановка проблеми та її актуальність. За оцінками багатьох вчених в останні роки як Арктичний так і Антарктичний регіони виявляють найбільші рівні прояву ознак глобального потепління [1-3]. Продовження потепління буде мати суттєві наслідки: скорочення снігового покриву та відступання берегового льоду може призвести до оголення порід та багаторічних мерзлих ґрунтів. Скорочення