

СТРАТОСФЕРНО-ТРОПОСФЕРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ОЗОНОВЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА

*Красовский А.Н., Турьшев Л.Н., Светашев А.Г.,
Бородко С.К., Мицкевич Я.М.*

Национальный научно-исследовательский центр
мониторинга озоносферы БГУ,
г. Минск

В настоящее время основу метеорологического прогнозирования различной временной заблаговременности, а также предсказания климатических изменений регионального и глобального характера, составляет использование численных моделей атмосферных процессов различной степени сложности.

Краткосрочное метеорологическое прогнозирование основывается на детерминистических моделях, совершенствование которых наряду с постоянным увеличением доступной вычислительной мощности суперкомпьютерных систем позволило к настоящему моменту достигнуть высокого качества прогноза погодных явлений различного класса. В то же время, по-прежнему наблюдаются случаи ошибочного или недостаточно достоверного прогноза, в том числе и в связи с предсказанием опасных погодных явлений.

Было выявлено, что такие случаи зачастую связаны с резкими изменениями положения стационарных атмосферных фронтов, являющихся границами тропосферных воздушных масс планетарного масштаба. В частности, для территории Республики Беларусь особо важную роль играет полярный стационарный фронт, положение которого определяет границу арктической и умеренной глобальных воздушных масс.

С другой стороны, в повышении заблаговременности метеорологического прогноза (до двух недель и далее), а также совершенствовании методов сезонного прогнозирования и предсказания регионального климата фундаментальную роль, наряду со стохастическими методами прогнозирования, играет улучшение граничных условий в численном моделировании. Влияние граничных условий на моделируемые процессы тем больше, чем о большем временном сроке идёт речь (роль начальных условий модели при этом, напротив, уменьшается). В моделях глобальной циркуляции, используемых для прогнозирования

на длительный срок, граничные условия практически полностью определяются характеристиками подстилающей поверхности суши и океана снизу, а также параметрами стратосферы и вышележащих слоёв атмосферы сверху. В связи с этим, развитие методов среднесрочного, долгосрочного и, в особенности, сезонного прогнозирования напрямую зависит от улучшения представления в численных моделях земной поверхности и океана, с одной стороны, и, с другой стороны, процессов в верхних слоях атмосферы, определяющую роль в которых играет стратосферный озон.

Представлению процессов в земной поверхности и моделированию глобальной циркуляции океана уже длительное время посвящены усилия различных исследовательских групп ряда мировых научных и прогностических центров. Моделирование же стратосферы и других верхних слоёв атмосферы стало активно развиваться лишь относительно недавно. Во всех современных численных моделях глобальной циркуляции атмосферы, используемых в прогнозировании погоды и климата, так или иначе представлены основные динамические процессы практически всего слоя стратосферы. Таким образом, стратосферные процессы в определённой степени уже являются частью самой численной модели, а не внешним для неё граничным условием (верхние граничные условия при этом в существенной мере определяются верхней стратосферой, мезосферой и вышележащими слоями). В то же время, даже в модели глобальной циркуляции атмосферы IFS (Integrated Forecasting System) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF), которая на данный момент признаётся наиболее развитой, стратосферный озон в прогностической динамике рассматривается как пассивный трассер, что выражается в использовании в схемах переноса излучения стандартного климатологического распределения озона [6]. Таким образом, реальная динамика стратосферного озона по-прежнему не имеет в модели никакого влияния на атмосферную циркуляцию.

Целью настоящего исследования является анализ различных проявлений взаимодействия между стратосферным озоном и циркуляцией в тропосфере и выявление механизма воздействия стратосферного озона на долгосрочный характер погоды и региональный климат, что должно

позволить качественно улучшить как непосредственно представление стратосферных процессов в численных атмосферных моделях, так и верхние граничные условия в них.

Атмосферный озон является одним из важнейших атмосферных газов в силу своих оптических свойств. Именно наличие озона в атмосфере Земли обуславливает существование мощного слоя температурной инверсии – стратосферы, ограничивающего вертикальные масштабы развития конвективных процессов, протекающих в самой нижней части атмосферы – тропосфере. Поглощение солнечного излучения озоном определяет термическую структуру слоя атмосферы по меньшей мере 40 км толщины.

Роль озона в глобальной климатической системе в настоящее время является объектом интенсивных исследований. Общеизвестно, что распределение стратосферного озона и динамика стратосферы так или иначе взаимосвязаны с тропосферой и влияют друг на друга в различных процессах стратосферно-тропосферного взаимодействия.

В частности, многочисленные наблюдения подтверждают взаимосвязь между полем общего содержания озона (ОСО) и распределением крупномасштабных воздушных масс в тропосфере и стратосфере. В ряде исследований было показано, к примеру, что практически все локальные озоновые аномалии (отклонения синоптического масштаба в поле ОСО) соответствуют локальному изменению уровня тропопаузы, и существенный объём исследований был посвящён рассмотрению локальных неоднородностей в распределении стратосферного озона, появляющихся под влиянием синоптических образований и погодных систем в тропосфере.

Исследования изменений регионального и глобального климата и взаимосвязи этих изменений со стратосферным озоном осуществляются в НИИЦ МО БГУ совместно с Главной геофизической обсерваторией (ГГО) им. А.И. Воейкова РАН. Основной целью является детальное исследование причинно-следственных связей динамики стратосферного озона и движения тропосферных воздушных масс. Особое внимание при этом уделяется рассмотрению одной из сторон этого взаимодействия: влиянию распределения стратосферного озона на характеристики тропосферной циркуляции и связанные с ними погодные и климатические условия. Анализ

обширных данных наблюдений указывает на чёткую корреляцию между распределением стратосферного озона, синоптическими образованиями и границами воздушных масс в верхней тропосфере и температурным полем верхней стратосферы [1, 2].

В рамках проводимого анализа рассматриваются особенности режима глобальной циркуляции в тропосфере и нижней стратосфере и сопутствующих им аномалий распределения стратосферного озона для изучения механизмов взаимодействия и выявления причинно-следственных связей. Помимо собственного экспериментального материала, используются данные атмосферного реанализа ERA-Interim [5] Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF, а также данные анализа и прогноза американской модели глобальной циркуляции атмосферы GFS [8]. Кроме того, в настоящее время анализируются также результаты численного моделирования глобальной циркуляции атмосферы в модели OpenIFS, представляющей собой версию модели IFS для использования вне ECMWF [7] (по лицензии, полученной НИИЦ МО БГУ от ECMWF), и негидростатического моделирования в заданном регионе с высоким пространственным разрешением с помощью модели WRF.

Большинство исследований взаимосвязи озона и климата посвящены анализу осреднённого за некоторый достаточно длительный промежуток времени состояния атмосферы, в некоторых случаях ограничиваясь, к тому же, его зональным осреднением. С другой стороны, в рамках разрабатываемой в БГУ концепции взаимодействия озонового слоя и тропосферной циркуляции рассматривается мгновенное состояние глобальной циркуляции в тропосфере и распределения озона в стратосфере с наилучшим доступным временным разрешением (как правило, данные мировой сети метеонаблюдений доступны 4 раза в сутки). Основное внимание при этом уделяется положению стационарных атмосферных фронтов (высотных фронтальных зон), определяющих границы глобальных тропосферных воздушных масс и соответствующих им ячеек глобальной циркуляции атмосферы, а также внутритропической зоны конвергенции (intertropical convergence zone – ITCZ). Как было показано на основе анализа данных наблюдений ГГО им. А.И. Воейкова [1, 2], а также впоследствии в [11, 12], различным типам

тропосферных воздушных масс планетарного масштаба соответствуют различные «метеорологические режимы» значений общего содержания озона и различный характер вертикального распределения озона.

Поверхность стационарного фронта с характерными разрывами в метеорологических полях простирается от земной поверхности через всю толщу тропосферы вплоть до тропопаузы. Именно в области тропопаузы и в переходном слое верхняя тропосфера – нижняя стратосфера располагаются основные особенности стационарных фронтов, отражающие их тесную взаимосвязь со стратосферно-тропосферными взаимодействиями.

В свою очередь, тропопауза в области стационарного фронта претерпевает разрыв (переход от более высокой тропической тропопаузы к более низкой тропопаузе умеренных широт в области субтропического стационарного фронта, аналогично, переход от тропопаузы умеренных широт к еще более низкой полярной тропопаузе в области полярной стационарного фронта). Еще одной фундаментальной особенностью стационарного фронта является расположение в его верхней части непосредственно в области тропопаузы соответствующего (субтропического или полярного) стационарного струйного течения.

Объективная идентификация стационарных атмосферных фронтов на основе данных реанализа, наблюдений или результатов моделирования атмосферной модели составляет, наряду с объективной идентификацией внутритропической зоны конвергенции, одну из основных задач данного исследования. Для реализации объективной идентификации могут использоваться различные отличительные характеристики стационарных фронтов.

Теоретически, может использоваться тот же подход, что и для обычных синоптических тропосферных фронтов. Хотя идентификация тропосферных атмосферных фронтов при синоптическом анализе метеорологической обстановки по-прежнему остаётся в значительной степени субъективной, к примеру, в [9] приводится обзор основных методов объективной идентификации атмосферных фронтов, основанных на различных вариантах концепции «термического фронтального параметра» (ТФП). Вычисление величины ТФП, как правило, связано с применением однократного или многократного пространственного дифференцирования

(градиент или производная по направлению) по отношению к тем или иным переменным в исходном наборе данных. Как правило, используется однократное или многократное пространственное дифференцирование поля температуры или потенциальной температуры вблизи поверхности или на некотором приземной изобарическом уровне. В [9] также приводится оценка устойчивости и применимости каждого из рассматриваемых методов объективной идентификации фронтов, однако, следует отметить, что ни один из приведённых методов не обеспечивает безошибочной идентификации атмосферных фронтов во всех случаях без ложного срабатывания.

С другой стороны, в основу объективной идентификации могут быть положены именно характерные особенности стационарных фронтов в верхней тропосфере – нижней стратосфере. Во-первых, анализ градиентов и разрывов в полях температуры, приземной температуры или геопотенциала может осуществляться на более высоких изобарических поверхностях. Во-вторых, может рассматриваться градиент изэнтропического потенциального вихря на изэнтропических поверхностях в области верхней тропосферы – нижней стратосферы. Поскольку изэнтропический потенциальный вихрь может рассматриваться как динамический трассер, для которого в адиабатических (изэнтропических) течениях выполняется закон сохранения, он может использоваться для анализа принадлежности воздуха различным воздушным массам и определению границ между ними. Кроме того, может использоваться поиск струйных течений, всегда сопровождающих стационарные фронты, в области тропопаузы или на близлежащих изобарических поверхностях [10]. Например, в некоторых публикациях для идентификации субтропического стационарного фронта используется поиск струйного течения на поверхности 200 гПа, а для полярного стационарного фронта – на поверхности 300 гПа [2].

Наконец, объективная идентификация стационарных фронтов может основываться непосредственно на анализе поверхности тропопаузы. Рельеф тропопаузы напрямую отражает общую картину глобальной циркуляции атмосферы, при этом стационарных фронтам на границах циркуляционных ячеек соответствуют скачки и разрывы поверхности

тропопаузы (в ряде случаев наблюдается также явление «двойной тропопаузы»). Конкретная реализация метода зависит от самого определения тропопаузы.

Обнаружение термической тропопаузы, основанной на определении Всемирной Метеорологической Организации, сводится к анализу вертикальных профилей температуры [18]. При этом поиск термической тропопаузы на полях данных расчётной сетки сопряжён с трудностями, связанными с нерегулярным расположением уровней вертикальной координаты используемой численной модели и низким вертикальным разрешением. Возможный метод преодоления таких трудностей заключается в использовании ранее предложенного алгоритма [14].

В основе концепции динамической тропопаузы лежит анализ трёхмерного поля изэнтропического потенциального вихря, что обусловлено резким отличием значений изэнтропического потенциального вихря для тропосферных и стратосферных воздушных масс. Как правило, за поверхность тропопаузы принимается поверхность некоторого фиксированного значения величины изэнтропического потенциального вихря (по всей видимости, величина 2 PVU используется чаще всего, однако единого критерия выбора этой величины не существует). В то же время, более перспективным и объективным представляется предложенное в [13] определение динамической тропопаузы, основанное на анализе градиентов изэнтропического потенциального вихря. Определённые трудности при использовании понятия динамической тропопаузы связаны с неопределённостью значений изэнтропического потенциального вихря вблизи экваториальной области (изэнтропические поверхности вблизи экватора становятся вертикальными), в связи с чем данный метод применим только для достаточно высоких широт. Для определения глобального рельефа тропопаузы предлагается «гибридный» метод, сочетающий в себе термическую и динамическую тропопаузу [16, 17].

Непосредственно в экваториальной области располагается другая характерная особенность планетарной циркуляции – внутритропическая зона конвергенции, соответствующая области восходящих потоков циркуляционной ячейки Хэдли [20]. Как правило, в метеорологической литературе положение внутритропической зоны конвергенции определяется исходя из анализа

данных наблюдений обильных тропических осадков за определённый промежуток времени – такой подход позволяет изучать осреднённые климатологические характеристики внутритропической зоны конвергенции в различных частях Земли; в других исследованиях используется также и зональное осреднение [19]. Для этого используется осреднённое за месяц поле ветра на уровнях ниже 900 гПа [20].

В свою очередь, анализ мгновенного положения внутритропической зоны конвергенции представляет собой достаточно трудную задачу. Используемый в рамках данной работы подход основывается на комплексном анализе поля ветра, его дивергенции и вихря, а также вертикальной скорости как вблизи поверхности, так и в верхней тропосфере. При этом неизбежно применение определённого локального осреднения в связи с высокой изменчивостью метеорологических полей в той достаточно обширной пространственной области, которую занимает внутритропическая зона конвергенции (в отличие от стационарных фронтов, она имеет существенную ширину вдоль меридиана).

Совместный анализ мгновенного положения полярного и субтропического стационарных фронтов в обоих полушариях, положения внутритропической зоны конвергенции, а также, в общем случае, и связанного с ними глобального рельефа тропопаузы позволяет построить общую картину планетарной циркуляции в тропосфере в заданный момент времени с акцентом именно на её глобальных характеристиках. Сопоставление этой картины циркуляции с планетарным распределением стратосферного озона в соответствующий момент времени, а также в предшествующие и последующие моменты времени, составляет методологическую основу настоящего исследования и позволяет делать выводы о причинно-следственных связях между динамикой стратосферного озона и тропосферной циркуляцией, а также о конкретных деталях механизма реализации этих причинно-следственных связей.

В то время как термодинамические процессы в неустойчивой тропосфере (вертикальная конвекция) стремятся поднять тропопаузу выше, воздействие озонового механизма в стратосфере (поглощение солнечного излучения и радиационный нагрев) понижает её уровень. Процессы в нижней стратосфере, изменяя высоту тропопаузы в данной области, оказывают

влияние на положение стационарных атмосферных фронтов, разделяющих глобальные ячейки циркуляции. Таким образом, влияние озона на погоду и климат в заданном регионе осуществляется не через некоторое прямое воздействие на атмосферные потоки, а в первую очередь путём изменения положения стационарных фронтов и непосредственно характеристик самих глобальных циркуляционных ячеек (например, само смещение уровня тропопаузы может иметь воздействие на ячейку циркуляции). Взаимное влияние и относительная роль тропосферных и стратосферных механизмов зависят от региона и времени года. В тропической области преобладают термодинамические процессы (конвекция) в неустойчивой тропосфере, а в полярных широтах преобладает стратосферный озоновый механизм. В зоне средних широт, в которой располагается Беларусь, в летний период существенное влияние оказывают тропосферные процессы, а в зимний период начинает преобладать и играть существенную роль озоновый механизм. В соответствии с соображениями Лоренца о роли потенциальной энергии в глобальной циркуляции атмосферы, количественная оценка относительной роли каждого класса процессов может проводиться путём сопоставления полученной за счёт радиационного нагрева потенциальной энергии стратосферы с энергией неустойчивости тропосферы, связанной с вертикальной конвекцией. Порядка 3% приходящего солнечного излучения поглощается озоном напрямую в толще стратосферы и тратится на её нагрев (тропофера же, в свою очередь, прогревается от поглощающей солнечное излучение земной поверхности) [2]. Результирующее количество энергии распределяется в соответствии с вертикальным профилем озона в стратосфере и может быть сопоставимо с энергией неустойчивости в тропосфере, а в ряде случаев зимние механизмы озонового воздействия могут оказаться и сильнее сопутствующей термодинамической неустойчивости в тропосфере.

Что касается способов влияния вышеизложенного механизма непосредственно на погоду и климат в заданном регионе, то можно выделить следующие:

- изменение положения стационарных фронтов, являющихся границами между ячейками глобальной циркуляции, может привести к перемещению в данный регион

воздушной массы другого типа (арктического воздуха – АВ, умеренного воздуха – УВ, тропического воздуха – ТВ);

- стационарные фронты тесно связаны с процессами циклоногенеза и в значительной степени определяют траектории движения барических образований тропосферы;

- изменение высоты тропопаузы над выделенной воздушной массой может влиять на интенсивность и общий характер тропосферной циркуляции в соответствующей ячейке.

В значительной мере формирование циркуляционной системы является замкнутым процессом – тропофера влияет на распределение озона в нижней стратосфере, которая, в свою очередь, определяет перемещение планетарных воздушных масс [1]. Озоновый механизм непрерывно играет важную роль в формировании всей глобальной циркуляции и её сезонной перестройке. Как следует из анализа многолетних наблюдений, «ежегодно в период весеннего максимума ОСО максимально смещаются на юг все фронтальные зоны Северного полушария, включая зону внутритропической конвергенции, которая перемещается в Южное полушарие [2]. В период осеннего минимума ОСО все фронтальные зоны максимально смещаются на север. Наиболее существенно изменяется положение границы между АВ и УВ в зоне 120°-150° в.д. Если весной граница фронтальных зон достигает 40° с.ш., то осенью поднимается до 65°-70° с.ш.» [1].

В то же время, наиболее показательным озоновый механизм может быть проиллюстрирован именно случаями отклонения от многолетней нормы полей общего содержания озона и расположения глобальных воздушных масс. В качестве такого примера можно привести весну 2013 г. Высокие значения ОСО в Северном полушарии в начале 2013 г. (рис. 1) привели к понижению уровня тропопаузы над Атлантикой и смещению полярной фронтальной зоны на юг, что, в конечном счёте, привело к холодному весеннему сезону в Европе. В сравнении с другими годами, более выраженный весенний максимум ОСО вызвал аномально холодную весну [3, 4].

В других случаях особенности текущего распределения ОСО и вызванные ими изменения рельефа тропопаузы, влияют на формирование циклонов и антициклонов и траектории их движения, приводят к появлению блокирующих ситуаций в тропосфере, связанных с аномальной

жарой и засухой в одних регионах и избытком осадков в других [2].

Наибольший интерес представляет случай внезапного стратосферного потепления над Восточной Сибирью в ноябре 2013 г. [3, 4]. В то время как климатическая норма для этого периода предполагает осенний минимум, ОСО и максимальное смещение всех фронтальных зон на север, к середине ноября над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока наблюдался выраженный локальный максимум ОСО и связанные с его появлением резкие повышения температуры в стратосфере (на 25° в течение одного дня).

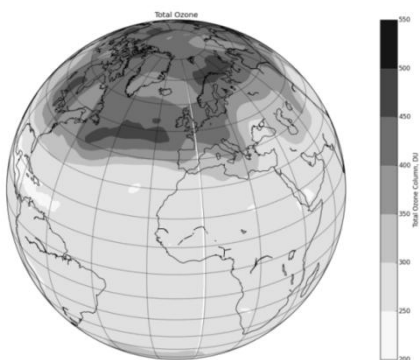


Рисунок 1. – *Выраженный весенний максимум ОСО над Северной Атлантикой (общее содержание озона на 1 апреля 2013 г., на основе данных ERA-Interim)*

Такая картина распределения ОСО (рис. 2) вызвала соответствующее локальное понижение тропопазы и последующее смещение полярного стационарного фронта на юг.

В последующие дни ноября и декабря 2013 г. наблюдалось смещение на юг полярного и субтропического стационарных фронтов Северного полушария, выдавливание зоны внутритропической конвергенции в Южное полушарие и, к январю 2014 г., результирующий сдвиг на юг фронтальных зон Южного полушария, что, в конечном счёте, привело к аномальной жаре и интенсивным лесным пожарам в Австралии.

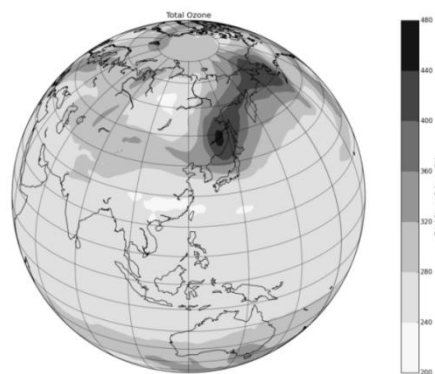


Рисунок 2. – *Выраженный максимум ОСО на Дальнем Востоке в ноябре 2013 г. (11 ноября 2013 г., на основе данных ERA-Interim)*

Список использованных источников:

1. Шаламянский А.М. Пространственно-временная структура поля озона в границах воздушных масс / А.М. Шаламянский // Атмосферный озон. Труды IV Всесоюзного симпозиума. – Л., 1987. – С. 230-237.
2. Шаламянский А.М. Концепция взаимодействия атмосферного озона и воздушных масс Северного полушария / А.М. Шаламянский // Труды ГГО им. А.И.Воейкова. – 2013. – Т. 568. – С. 173-194.
3. Barodka S. Observational and Modelling Studies of the Short-Term Climate Influences of the Ozone Mechanism / S. Barodka, A. Krasouski, A. Shalamyansky // SPARC 2014 General Assembly, Queenstown, New Zealand, 2014.
4. Barodka S. Impact of stratospheric ozone distribution on weather patterns and short-term regional climate / S. Barodka, Aliaksandr Krasouski, Arkady Shalamyansky // IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, Quebec, Canada, 2014.
5. Dee D. P. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N. Vitart F. // Q.J.R. Meteorol. Soc. – 2011. – V. 137. – P. 553–597.
6. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). IFS documentation CY40r1 / ECMWF // Mode of access: <http://old.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY40r1>, Date of access: 25.02.2015.
7. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). OpenIFS Documentation / ECMWF // Mode of access: <http://software.ecmwf.int/wiki/display/OIFS/Documentation>, Date of access: 25.02.2015.
8. Global Forecast System data at NOAA National Operational Model Archive & Distribution System (NOMADS) / Mode of access: <http://nomads.ncep.noaa.gov/data.php>, – Date of access: 25.02.2015.
9. Hewson, T. D. Objective fronts / T.D. Hewson // Met. Apps. – 1998. – 5. – P. 37–65.
10. Hoskins B. J. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps / B.J. Hoskins, M.E. McIntyre, A.W. Robertson // Q.J.R. Meteorol. Soc. – 1985. – V. 111. – P. 877–946.
11. Hudson R.D. The total ozone field separated into meteorological regimes. Part I: defining the regimes / R.D. Hudson, A.D. Frolov, M.F. Andrade, M.B. Follette // J. Atmos. Sci. – 2003. – V. 60. – P. 1669-1677.
12. Hudson R.D. The total ozone field separated into meteorological regimes. Part II: Northern Hemisphere mid-latitude total ozone trends / Hudson R.D., Andrade M.F., Follette M.B., Frolov A.D. // Atmos. Chem. Phys. – 2006. – 6. – P. 5183-5191.
13. Kunz A. Dynamical tropopause based on isentropic potential vorticity gradients / A. Kunz, P. Konopka, R. Müller, L.L. Pan // Journal of Geophysical Research. – 2011. – V. 116. – D01110.
14. Reichler T. Determining the tropopause height from gridded data / T. Reichler, M. Dameris, R. Sausen // Geophysical Research Letters. – 2003. – V. 30. – N. 20, 2042.
15. Skamarock W.C. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 / W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, J.G. Powers // NCAR Technical Note. – 2008. – NCAR / TN-468+STR – Mode of access: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf, – Date of access: 25.02.2015.
16. Wilcox L.J. A global blended tropopause based on ERA data. Part I: Climatology / L.J. Wilcox, B.J. Hoskins, K.P. Shine // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2012. – V. 138(664). – P. 561–575.
17. Wilcox L.J. A global blended tropopause based on ERA data. Part II : trends and tropical broadening / L.J. Wilcox, B.J. Hoskins, K.P. Shine // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2012. – V. 138(664). – P. 576–584.
18. World Meteorological Organization. Meteorology – a three-dimensional science / World Meteorological Organization // WMO Bull. – 1957. – 6. – P. 134-138.
19. Xian P. Abrupt Seasonal Migration of the ITCZ into the Summer Hemisphere / P. Xian, R.L. Miller // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2008. – V. 65. – P. 1878–1895.
20. Žagar N. Climatology of the ITCZ derived from ERA Interim reanalyses / N. Žagar, G. Skok, J. Tribbia // Journal of Geophysical Research. – 2011. – V. 116. – D15103.