

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук»
(НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук
(СПБНЦ РАН)

Научный Фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному
зондированию имени Нансена»
(Фонд «Нансен-центр»)

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ЗЕМЛЯ И КОСМОС»
К СТОЛЕТИЮ АКАДЕМИКА РАН
К.Я. КОНДРАТЬЕВА**

СБОРНИК СТАТЕЙ

**Санкт-Петербург
2020**

Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева. 20-21 октября 2020 года, Санкт-Петербург – Сборник статей – СПб.: 2020. – 334 с.

ISBN 978-5-6044977-3-9

В сборнике докладов конференции «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева представлены результаты современных исследований системы «Солнце-атмосфера-Земля» на основе дистанционных методов зондирования со спутников, самолетов-лабораторий, беспилотных летательных аппаратов, а также наземных средств мониторинга парниковых газов, аэрозолей и облаков, ледяного покрова в Арктике. Выявлено, что климатические аномалии среднегодовой температуры в наибольшей степени проявляются в Арктике и особенно в Сибири. Представлены работы по численному моделированию взаимодействия физических и химических процессов в атмосфере, по идентификации фундаментального глобального климатического колебания, а также результаты экспериментальных исследований для решения народно-хозяйственных задач по освоению природных ресурсов и при строительстве соответствующей инфраструктуры и реализации Северного морского пути в Арктике. В докладах обсуждены вопросы применения методов дистанционного мониторинга изменений окружающей среды для нужд сельского хозяйства, проблемы, связанные с лесными пожарами, с источниками техногенных отходов и отвалов, с регистрацией и прогнозированием природных и техногенных катастроф. Рассмотрены результаты исследований трансграничного переноса загрязняющих веществ в атмосфере, источники и стоки парниковых газов, результаты Пан-Евразийских Экспериментов, вопросы автоматизации и обработки спутниковых данных, проблемы экологической безопасности территорий разного масштаба и др.

Все выше перечисленные направления исследований во многом являются продолжением тех работ, которые выполнялись ранее под руководством академика РАН К.Я. Кондратьева.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-05-20027.

Тексты статей публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-6044977-3-9



© Коллектив авторов, 2020

Программный комитет

Председатель:

Бондур Валерий Григорьевич,
вице-президент РАН, академик РАН

Заместитель председателя:

Савиных Виктор Петрович, академик РАН

Члены Программного комитета:

Бузников Анатолий Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Варотсос Костас,
профессор, Афинский национальный университет
имени Каподистрии

Зеленый Лев Матвеевич,
академик РАН, профессор,
научный руководитель ИКИ РАН

Лупян Евгений Аркадьевич,
доктор технических наук,
заместитель директора ИКИ РАН

Кондратьева Светлана Ивановна

Разумовский Владимир Михайлович,
доктор географических наук, профессор,
вице-президент РГО

Румянцев Владислав Александрович,
академик РАН,
научный руководитель ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН

Бобылев Леонид Петрович,
кандидат физико-математических наук,
директор Фонда «Нансен-центр»

Двас Григорий Викторович,
доктор экономических наук, профессор,
главный ученый секретарь СПбНЦ РАН

Инге-Вечтомов Сергей Георгиевич,
академик РАН, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Крэкнелл Артур Филип,
профессор,

университет Данди, Великобритания
Петрукович Анатолий Алексеевич,
член-корреспондент РАН, директор ИКИ РАН

Ронжин Андрей Леонидович,
доктор технических наук, профессор РАН,
директор СПб ФИЦ РАН

Филатов Николай Николаевич,
член-корреспондент РАН, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Юсупов Рафаэль Мидхатович,
член-корреспондент РАН, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ,
научный руководитель СПИИРАН

Организационный комитет

Председатель:

Тронин Андрей Аркадьевич,
доктор геолого-минералогических наук, и.о. директора НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Заместитель председателя:

Биненко Виктор Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор, НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Члены Организационного комитета:

Барталев Сергей Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ИКИ РАН

Донченко Владислав Константинович,
доктор экономических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Логинов Владимир Федорович,
академик Национальной академии наук Беларуси

Крапивин Владимир Федорович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, ИРЭ РАН

Смышляев Сергей Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
РГГМУ

Угрюмов Александр Иванович,
доктор географических наук, профессор,
РГГМУ

Белан Борис Денисович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заместитель директора ИОА СО РАН

Махура Александр Григорьевич,
кандидат физико-математических наук,
Институт исследований системы Земля-атмосфера
Хельсинкского университета

Погорельцев Александр Иванович,
доктор географических наук, профессор, РГГМУ

Покровский Олег Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
РГГМУ

Тимофеев Юрий Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, СПбГУ

Щукин Георгий Георгиевич,
доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки РФ, профессор,
ВКА им. А.Ф. Можайского

Коваль А.В.^{1*}, Гаврилов Н.М.¹, Погорельцев А.И.^{1,2}, Шевчук Н.О.¹

Моделирование чувствительности общей циркуляции атмосферы к изменению солнечной активности в термосфере

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, дом 7–9

*E-mail: a.v.koval@spbu.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный гидрометеорологический университет»

Россия, 192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, дом 79

С использованием численной модели проведено исследование чувствительности общей циркуляции атмосферы к изменениям солнечной активности (СА) в термосфере. В исследовании используется модель средней и верхней атмосферы МСВА. Для достижения достаточной статистической достоверности глобальная циркуляция атмосферы моделируется на основе двух ансамблей из 16 прогонов модели, учитывающих низкую и высокую СА выше 100 км. Показано, что колебания СА способствуют изменению среднего зонального ветра и температуры в средней атмосфере до 10%. Наиболее интересный вывод состоит в том, что воздействие изменений СА на термосферу выше 100 км может значительно влиять на динамический и тепловой режимы на высотах ниже 100 км, за счет изменения волноводных свойств атмосферы. Эти результаты моделирования важны для дальнейшего понимания механизмов воздействия СА на динамику средней атмосферы.

Ключевые слова: общая циркуляция, планетарные волны, численное моделирование, солнечная активность.

**Andrey V. Koval^{1*}, Nikolai M. Gavrilov¹, Alexander I. Pogoreltsev^{1,2},
Nikita O. Shevchuk¹**

Modelling of the sensitivity of general atmospheric circulation to solar activity changes in the thermosphere

¹Saint-Petersburg State University
Russia, 199034, Saint Petersburg, Universitetskaya emb. 7–9

* E-mail: a.v.koval@spbu.ru

²Russian State Hydrometeorological University
Russia, 192007, Saint-Petersburg, Voronezhskaya ulitsa, 79

Using a numerical model, a study of the sensitivity of the general atmospheric circulation to changes in solar activity (SA) in the thermosphere was performed. The study uses a model of the middle and upper atmosphere MUAM. To achieve sufficient statistical confidence, the global atmospheric circulation is simulated on the basis of two ensembles of 16 model runs, taking into account low and high SA above 100 km. It is shown that SA fluctuations contribute to a change in the mean zonal wind and temperature in the middle atmosphere up to 10%. The most interesting conclusion is that the effect of changes in SA in the thermosphere above 100 km can significantly affect the dynamic and thermal regime at altitudes below 100 km, due to changes in the waveguide features of the atmosphere. These simulation results are important for further understanding the mechanisms of the influence of SA on the dynamics of the middle atmosphere.

Keywords: general circulation, planetary waves, numerical simulation, solar activity.

Введение

Солнечная активность (СА) испытывает циклические колебания с периодом около 11 лет [1], что влияет на тепловые и динамические характеристики циркуляции атмосферы. Прежде всего, это приводит к значительным изменениям в распространении планетарных волн (ПВ) в разных слоях атмосферы [2]. При этом, крупномасштабные атмосферные волны играют существенную роль в динамике средней и

верхней атмосферы, способствуя переносу энергии и импульса [3]. Значительные изменения активности ПВ были выявлены при анализе реакции среднегодовой температуры и ее сезонных колебаний на солнечный 11-летний цикл [4]. Также на циркуляцию атмосферы может влиять частичное отражение ПВ, распространяющихся из тропосферы на высотах нижней термосферы [5].

Нелинейная численная механистическая модель средней и верхней атмосферы (МСВА) была расширена для моделирования общей циркуляции и распространения ПВ на высотах от тропосферы до 300 км [6]. Моделирование с помощью МСВА выявило существенные изменения общей циркуляции и ПВ на высотах выше 100 км из-за вариаций СА [7, 8]. В данном исследовании мы расширили количество прогонов МСВА и получили статистически достоверные результаты, показывающие существенную реакцию динамики стратосферы и мезосферы на изменения СА на высотах выше 100 км. Моделирование с помощью МСВА проводилось на высотах 0–300 км, при этом разные уровни СА задавались в модели на высотах выше 100 км. С помощью такого подхода мы избегаем прямого воздействия солнечной радиации на среднюю атмосферу и, следовательно, выявляем эффекты, связанные с возможной динамической связью термосферы и средней атмосферы посредством взаимодействий ПВ со средним потоком.

Методология и численное моделирование

Для изучения изменений глобальной циркуляции средней атмосферы были проведены численные расчеты с использованием нелинейной механистической модели МСВА [6]. Эта модель разработана на основе конечно-разностной модели Института метеорологии средней атмосферы Лейпцига (СОММА-LIM), описанной в [9]. В модели МСВА решается система стандартных гидродинамических уравнений в сферических координатах. Сетка модели имеет $36 \times 64 \times 56$ узлов вдоль широты, долготы и по высоте, соответственно. Ключевые характеристики и физические процессы, учитываемые в модели, описаны в [6, 7].

В качестве входного параметра для индикации различных уровней СА в радиационном блоке МСВА используется поток солнечного излучения с длиной волны 10,7 см (F10.7). Поток F10.7 циклически изменяется с периодами около 11 лет. Эти изменения коррелируют с изменениями числа Вольфа, поэтому поток F10.7 является основной характеристикой СА. На основании измерений шести последних солнечных циклов были выбраны значения $F10,7 = 220, 130, 70$ sfu, соответствующих высокому, среднему и низкому уровням СА соответственно ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Вт} / (\text{м}^2\text{Гц})$). Поскольку основной целью данного исследования является изучение термосферных эффектов вариаций СА, минимальные и максимальные значения F10.7 были определены на высотах выше 100 км. Для учета воздействия ионизированных компонент на движение нейтрального газа для различных уровней СА, в МСВА учтены ионосферные проводимости, и их временные и пространственные неоднородности [7].

Для анализа и интерпретации моделируемой атмосферной циркуляции, был рассчитан поток Элиассена-Пальма (ЭП-поток) для ПВ и его дивергенция, которая определяет ускорение среднезонального зонального потока, производимого за счет воздействия атмосферных ПВ [10]. Для достижения достаточной статистической достоверности было выполнено 16 пар прогонов модели для низкой и высокой СА с использованием подхода, описанного в [8].

Результаты моделирования

С целью исследования влияния изменений СА в термосфере на циркуляцию в средней атмосфере, мы проанализировали наборы из 921600 пар значений смоделированных атмосферных параметров (зональный ветер и температура) за период с середины декабря по конец февраля, соответствующих низкому и высокому уровням СА (извлеченных из 16 прогонов модели * 900 значений по времени, соответствующих 2-х часовому выводу * 64 узла по долготе). Помимо повышения статистической достоверности, этот подход позволил нам «сгладить» влияние таких крупномасштабных динамических возмущений, как, например, события внезапных стратосферных потеплений, возникающие в отдельных прогонах модели.

Левые панели на рис. 1а, б представляют, соответственно, широтно-высотные распределения среднего зонального ветра и температуры на высотах 0–100 км, осредненные по временному интервалу с середины декабря по конец февраля, и по 16 прогонам МСВА при высокой СА. Полученные распределения соответствуют полумпирическим моделям температуры [11] и зонального ветра [12]. Правые панели на рисунках 1а, б отражают соответствующие различия между высоким и низким значениями СА в термосфере. Средние приращения зонального ветра и температуры в средней атмосфере из-за изменения СА выше 100 км могут достигать 3–4 м/с и 3 К. На высотах 40–100 км средние перепады температур имеют

максимальные значения в высоких и средних широтах северного полушария в правой части рисунка 1б. Оценка статистической достоверности различий, показанных на правых панелях рисунка 1, была проведена на основе парного критерия Стьюдента, как это было описано Ковалем в работе [8]. На уровне значимости $\alpha = 5\%$ средние различия в температуре и зональном ветре удовлетворяют гипотезе их ненулевых значений во всех точках сетки.

Изучению изменений среднего зонального ветра и температуры в средней атмосфере из-за изменений СА посвящено много работ. Например, анализ коэффициентов регрессии между СА и средней температурой и зональным ветром в зимние месяцы на основе данных атмосферного реанализа ERA-Interim показал заметные изменения в этих полях на высотах до 60 км [13]. В частности, был продемонстрирован существенный нагрев в тропической и охлаждение во внетропической стратосфере в условиях максимума СА по данным ERA-40. В работе [14] проведено численное моделирование для оценки влияния солнечного излучения на общую атмосферную циркуляцию с использованием химико-климатической модели SOCOL. Результаты, полученные для северных зимних условий, в целом согласуются с описанными выше результатами.

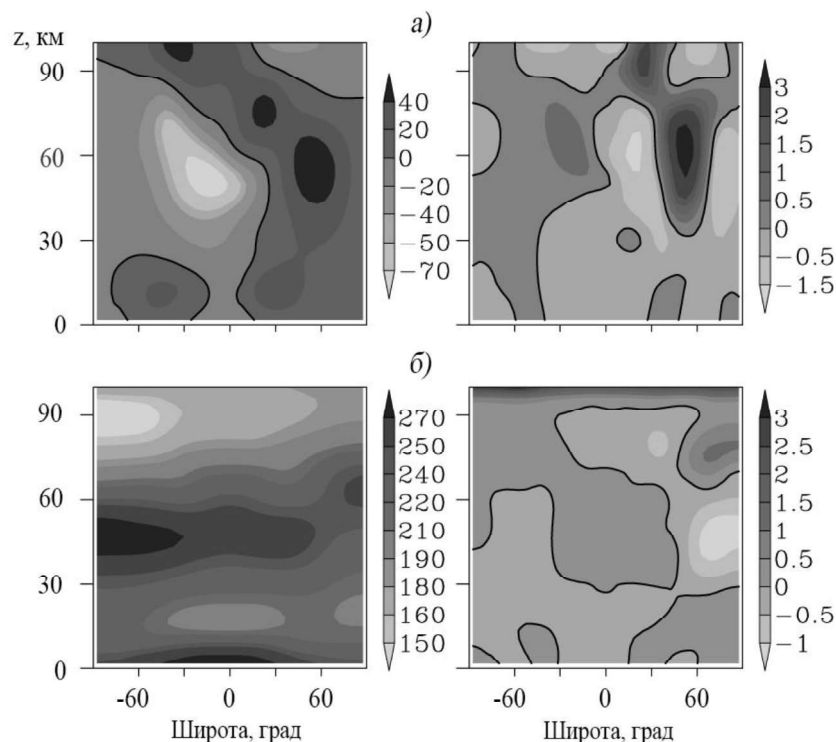


Рис. 1. Высотно-широтные распределения среднего зонального потока в м/с (а, слева) и температуры в К (б, слева) при высокой СА, а также их различия при низкой СА (правые панели), осредненные за временной отрезок с середины декабря по февраль и по 16 прогонам МСВА. Сплошные линии соответствуют нулевым уровням

Чтобы понять причины различий зонального ветра и температуры в средней атмосфере из-за термосферного воздействия СА в, мы проанализировали различные слагаемые в уравнениях движения и теплового баланса МСВА на высотах ниже 100 км. Основные различия были обнаружены в притоках тепла, вызванных горизонтальной адвекцией тепла и неадиабатическим нагревом/охлаждением из-за вертикальных движений воздуха в высоких северных широтах. Такие различия в нагреве и охлаждении могут быть вызваны взаимодействиями между средним потоком и ПВ, распространяющимися из нижних слоев атмосферы [15]. На рисунке 2 представлена вертикальная компонента ЭП-потока для стационарной ПВ с зональным волновым числом 1 и дивергенция потока ЭП-потока, рассчитанные для зимних месяцев. Левая и правая панели на рисунке 2 представляют обсуждаемые величины при высоком уровне СА и соответствующие различия между высокой и низкой СА.

Согласно классической теории атмосферных ПВ [10], направленный вверх ЭП-поток соответствует волновому потоку тепла, направленному на север. Он способствует потеплению средней атмосферы в высоких широтах. На правой панели рисунка 2а в высоких северных широтах показаны

отрицательные приращения ЭП-потока на высотах 30–60 км и положительные – выше 60 км, что соответствует отрицательным и положительным температурным различиям в соответствующих атмосферных слоях на правой панели на рисунке 1б. Такие нагрев и охлаждение средней атмосферы высоких широт могут изменять меридиональные температурные градиенты и приводить к изменениям зонального ветра в соответствующих слоях атмосферы. Дополнительное воздействие на циркуляцию могут оказывать ускорения зонального ветра, создаваемые в стратосфере при диссипации и/или нестационарности ПВ: на правой панели рисунка 2б показаны различия в дивергенции ЭП-потока: их максимумы находятся на высотах 40–100 км в средних и высоких северных широтах, где на правой панели рисунка 1а показаны наиболее существенные изменения зонального ветра.

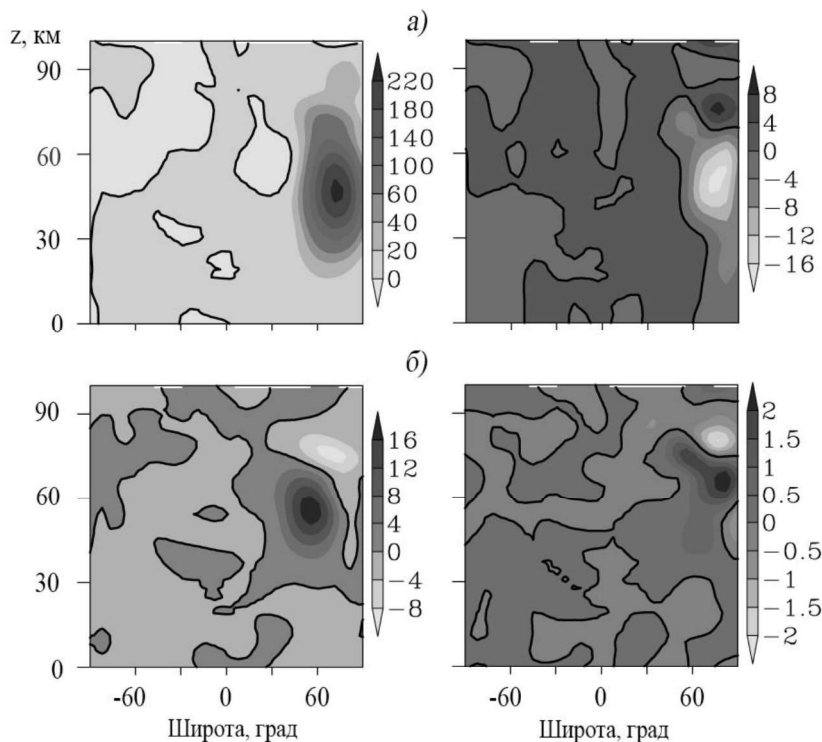


Рис. 2. Вертикальная компонента ЭП-потока в $10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}^2$ (а, слева) и дивергенция ЭП-потока в $\text{м}/\text{с}/\text{с}$ (б, слева) для высокой СА и их приращения за счет изменения СА (справа), осредненные за временной отрезок с середины декабря по февраль и по 16 прогнозам МСВА. Сплошные линии соответствуют нулевым уровням

Изменения среднего ветра и температуры, вызванные солнечным воздействием в условиях разной СА, могут изменять условия распространения ПВ в атмосфере, влияющих на общую циркуляцию [7]. С другой стороны, изменения в компонентах ЭП-потока для ПВ могут вызывать волновые ускорения и притоки тепла, приводящие к изменениям средней атмосферной циркуляции и температуры. Следовательно, взаимодействие между циркуляцией в средней атмосфере и ПВ не является стационарным процессом, а вызывает так называемые апериодические колебания, «васцилляции», имеющие периоды до нескольких недель [16]. Результаты моделирования МСВА также содержат такие колебания, следовательно, рассмотренные выше характеристики средней циркуляции и ПВ отражают кумулятивные эффекты этих колебаний, усредненных за зимний сезон.

Приращения зонального ветра и температуры на правых панелях рисунка 1 сильнее в северном (зимнем) полушарии. Это связано в первую очередь с тем, что зональный ветер в стратосфере летнего полушария направлен на запад, что предотвращает прямое распространение ПВ из нижней атмосферы [17]. Соответствующие распределения амплитуд стационарных ПВ для зимнего периода в северном полушарии представлены на рис. 1 и 3 из [8]. Это подтверждает, что изменения условий распространения ПВ на высотах термосферы могут изменять условия взаимодействия между средним потоком и волнами, воздействуя на тепловой режим и общую циркуляцию в средней атмосфере в зимний период.

Заклучение

Основное внимание в этой статье уделено изучению чувствительности общей циркуляции средней атмосферы к изменению солнечного воздействия в рамках цикла СА на основе численного моделирования. Модельные данные об атмосферной циркуляции получены путем обработки ансамблей из 16 прогонов с использованием трехмерной механистической модели общей циркуляции МСВА для низкой и высокой СА.

Изменения скорости зонального ветра и температуры могут достигать 10% на высотах 40–100 км в высоких и средних широтах северного полушария. Основные различия были обнаружены в слагаемых в уравнении теплового баланса МСВА, содержащих притоки тепла за счет горизонтальной адвекции и неадиабатического нагрева/охлаждения посредством вертикальных движений воздуха в высоких северных широтах. Получены значительные колебания вертикальной компоненты потока Элиассена-Пальма на высотах 40–100 км, которые связаны с повышениями и понижениями температуры в высоких северных широтах при высоком уровне СА. Результаты моделирования дают статистически достоверные подтверждения существующих представлений о том, что изменения в термосфере, вызванные цикличностью СА, могут влиять на условия распространения и отражения ПВ, вызывающих заметные динамические и тепловые изменения в средней атмосфере.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных исследований: моделирование общей циркуляции и расчет ПВ – грант №20-05-00450; анализ и интерпретация общей циркуляции и потоков Элиассена-Пальма – грант №18-05-01050.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Витинский Ю.И., Копецкий М., Ку克林 Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986, 296 с.
- [2] Arnold, N. F., & Robinson, T. R. Solar cycle changes to planetary wave propagation and their influence on the middle atmosphere circulation // *Ann. Geophysicae*, 1998, 16(1), 69–76.
- [3] Holton, J. R. The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere. *Meteorol. Monogr.* 15(37), 1975, 218 p.
- [4] Gan, Q., Du, J., Fomichev, V. I., Ward, W. E., et al. Temperature responses to the 11 year solar cycle in the mesosphere from the 31year (1979–2010) extended Canadian Middle Atmosphere Model simulations and a comparison with the 14year (2002–2015) TIMED/SABER observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 2017, 122(4), 4801–4818.
- [5] Lu, H., Scaife, A. A., Marshall, G. J., Turner, J., Gray, L. J. Downward wave reflection as a mechanism for the stratosphere-troposphere response to the 11-year solar cycle // *J. Clim.*, 2017, 30(N), 2395–2414. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0400.1
- [6] Pogoreltsev, A. I., Vlasov, A. A., Fröhlich, K., Jacobi, Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, 69, 2083–2101.
- [7] Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I, Shevchuk N.O., Influence of solar activity on penetration of traveling planetary-scale waves from the troposphere into the thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(8). 6888–6903.
- [8] Коваль А.В. Статистически значимые оценки влияния солнечной активности на планетарные волны в средней атмосфере Северного полушария по данным модели МСВА // *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 64–72.
- [9] Fröhlich, K., Pogoreltsev, A., Jacobi, Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model // *Advances in Space Research*, 2003, 32, 863–868.
- [10] Andrews, D.G., Holton, J.R., Leovy, C.B. *Middle atmosphere dynamics*. New York: Acad. Press. 1987, 489 p.
- [11] Picone, J.M., Hedin, A.E., Drob, D.P., Aikin, A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, 107(A12), 1468.
- [12] Jacobi, Ch., Fröhlich, K., Portnyagin, Y. Semi-empirical model of middle atmosphere wind from the ground to the lower thermosphere // *Adv. Space Res.* 2009, 43, 239–246.
- [13] Crooks, S.A., & Gray, L.G. Characterization of the 11-Year Solar Signal Using a Multiple Regression Analysis of the ERA-40 Dataset // *Journal of climate*, 2005, 18, 996–1015.
- [14] Rozanov, E., Egorova, T., & Schmutz, W. Response of the earth's atmosphere to the solar irradiance variability // *Advances in Global Change Research*, 2008, 33, 317–331.

- [15] Koval, A.V., Gavrilov, N.M., Pogoreltsev, A.I., & Shevchuk, N.O. (2019). Reactions of the middle atmosphere circulation and stationary planetary waves on the solar activity effects in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 10645-10658
- [16] Holton, J.R., & Mass, C. Stratospheric vacillation cycles // *J. Atmos. Sci.* 1976, 33, 2218–2215.
- [17] Charney, J.G., & Drazin, P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(1), 83–109.