

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**4 Центральный научно-исследовательский
орденов Трудового Красного Знамени,
Октябрьской Революции институт (г. Королёв)**

УДК 629.192:551.510

Т Р У Д Ы

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ В
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ**

В Ы П У С К 135

Под редакцией начальника
4 ЦНИИ Минобороны России
С.Е. Таразевича

(по материалам научно-технической конференции, состоявшейся в
4 ЦНИИ Минобороны России 18 и 19 мая 2017 года)

2 0 1 7

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Таразевич С.Е.</i> Вступительное слово председателя научно-технической конференции	9
<i>Елисейкин С.А., Подрезов В.А., Шишов Н.В.</i> Глобальная справочная модель атмосферы для баллистического обеспечения ракетно-космической практики	11
<i>Шишов Н.В.</i> Перспективная система метеорологического обеспечения ракетной техники	18
<i>Лавров А.С., Николаев Д.А., Стерин А.М.</i> Источники информации для уточнения нормативной базы и оценки изменения климатических характеристик параметров атмосферы слоя 0-30 километров	23
<i>Иванов В.Э., Плохих О.В., Шишов Н.В.</i> Методы повышения точности и надёжности оперативного контроля параметров атмосферы для обеспечения пусков ракетно-космических носителей	28
<i>Ермакова Е.С., Моцаков М.А., Погорельцев А.И., Фомин А.Н.</i> Зависимость от сезона суточных вариаций ветра на высотах средней атмосферы	35
<i>Богачёв П.С., Вареник П.А.</i> Практическая реализация методов учёта оперативной метеорологической информации при обеспечении пусков ракетно-космических носителей на космодроме Байконур	40
<i>Буш Г.А., Дёмин Д.С., Куличков С.Н., Чунчuzов И.П.</i> Тонкая неоднородная структура верхней атмосферы (20-120 километров) – теория и эксперимент	45
<i>Васьков С.В., Матвеев С.А., Суевалов В.В.</i> Использование модельных данных верхней атмосферы Земли для реализации режима прецизионной навигации перспективных космических систем	50
<i>Амелина М.Б.</i> Методологические основы численного моделирования восстановления параметров действительного и среднего ветра в алгоритмах, предназначенных для оперативного использования в программном обеспечении метеорологических комплексов высотного зондирования атмосферы	56
<i>Авдошкин В.В., Полуаришинов А.М.</i> Учёт особенностей локально-сезонной атмосферы при подготовке данных на пуски ракет-носителей и эксплуатации районов падения отделяющихся частей	61
<i>Вязанкин А.С., Кижжапкин В.А., Цветкова Н.Д., Юшков В.А.</i> Использование климатических моделей для развития проекта «Глобальная справочная модель атмосферы»	65

Дорошева Ю.В., Шипко Ю.В., Шувакин Е.В.

Особенности и тенденции циркумполярного вихря северного полушария на уровне 100 гПа 126

Кузнецов С.А., Шипко Ю.В., Шувакин Е.В.

Оценка внутренней структуры циркумполярного вихря северного полушария на уровне 100 гПа 131

Биболов Н.М., Дорофеев В.В., Степанов А.В.

Научно-методический подход к метеорологическому обеспечению поисково-спасательных работ при полётах космических объектов 136

Берестевич Г.В., Задорожная Т.Н., Закусилов В.П.

Возможность учёта циркуляционных особенностей тропосферы при баллистическом обеспечении ракетно-космической практики 141

Задорожная Т.Н., Закусилов В.П.

Тенденции в динамике климатических норм температуры воздуха на территории северного полушария и отдельных регионов 146

Булгин Д.В., Гедзенко Д.В., Кузнецов И.Е.

Методика оценки влияния метеоусловий на использование лазерных систем в ракетно-космической технике 151

Волков А.В., Краснобаев Ю.Л., Мелешко В.Ю., Сова А.Н.

Влияние на параметры атмосферы воздействий, возникающих при нештатных (аварийных) ситуациях на объектах ракетно-космической техники 155

Лобанов К.А., Подчасский А.С.

Радиофизический метод диагностики состояния ионосферы для задач геофизического обеспечения коротковолновой радиосвязи 159

Искоркин Д.В.

Аналитические зависимости математической модели артиллерийской атмосферы . . . 164

Жумашев А.А.

Обоснование показателей и выбор критериев оценки эффективности боевого применения сил и средств разведки главного центра разведки космической обстановки по обнаружению баллистических ракет в интересах главного центра предупреждения о ракетном нападении 169

Байрамов К.Р., Ляченков С.В., Таныгин А.В.

Влияние погрешности определения аэробаллистических коэффициентов на область попадающих траекторий гиперзвукового планирующего летательного аппарата 172

Елисейкин С.А., Кубасов И.Ю., Подрезов В.А.

Анализ функций влияния вариаций параметров атмосферы на отклонения точек падения отделяющихся частей ракет-носителей 175

Доклады, не вошедшие в виде статей в Сборник трудов конференции	241
Решение научно-технической конференции	243

УДК 550.385.21

ПРОБЛЕМЫ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОФИЗИКИ

С использованием данных нового ретроспективного анализа MERRA получены вертикальные профили среднесуточных значений зонального ветра, усреднённых за январь, а также среднемесячные профили зонального ветра для различных моментов локального времени в районе космодрома Восточный. Рассмотрены суточные вариации зонального и меридионального ветра на высоте 65 километров для условий солнцестояния и равноденствия с использованием модели HWM07 и данных MERRA. Для января-февраля выполнен ветвлет анализ внутри-сезонной изменчивости суточного и полусуточного приливов в поле зонального ветра.

Ключевые слова: суточные вариации ветра, средняя атмосфера, планетарные волны, нелинейные взаимодействия.

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СЕЗОНА СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Е.С. Ермакова, М.А. Моцаков, А.И. Погорельцев, А.Н. Фомин

Введение. В последние годы сотрудниками 4 ЦНИИ Минобороны и ЦЭНКИ была разработана Глобальная справочная модель атмосферы (ГСМА), которая позволяет рассчитывать климатические среднемесячные распределения температуры, относительного давления и плотности, а также зональной и меридиональной составляющих скорости ветра на высотах от 0 до 100 километров для баллистического обеспечения ракетно-космической практики [1]. Несмотря на то, что ГСМА достаточно хорошо описывает климатологию среднесезонных распределений метеорологических параметров и стационарных планетарных волн (по крайней мере, до высот мезосферы), в модели отсутствует учёт суточных вариаций, которые приводят к существенным отклонениям от среднемесячных значений в зависимости от локального времени, начиная с высоты порядка 60 километров и выше. Сотрудниками ФГБУ НПО «Тайфун» по данным глобальной сети радарных станций и данным спутниковых измерений (спутники UARS, TIMED, EOS Aura) разрабатывается прототип эмпирической модели EMMA (Empirical Model of the Middle Atmosphere) [2], которая построена на основе ранней версии модели GEWM (Global Empirical Wind Model) [3, 4] с учётом вариаций термодинамических параметров и горизонтального ветра в зависимости от локального времени. Кроме этого, существует международная программа по дальнейшему развитию справочной модели атмосферы CIRA (COSPAR International Reference Atmosphere) [5], в которой также учитываются суточные вариации атмосферных параметров. Следует отметить, что имеются существенные расхождения в результатах по суточным вариациям ветра на высотах мезосферы и нижней термосферы (МНТ), полученным с использованием EMMA и HWM07 (Horizontal Wind Model) [6], которая лежит в основе последней версии модели CIRA-2012. Эти расхождения обусловлены как использованием различных баз данных, так и методикой построения указанных эмпирических моделей. Обсуждение указанных различий в суточных вариациях ветра в МНТ, полученных с использованием EMMA и HWM07, выходит за рамки работы. Целью настоящего исследования является рассмотрение вопроса, начиная с каких высот необходим учёт суточных вариаций атмосферных параметров, оценка их сезонной и внутри-сезонной изменчивости и обсуждение возможных путей и подходов для учёта этих вариаций в ГСМА.

Вертикальная структура суточных колебаний ветра. Первые данные ре-анализа NCEP/NCAR, ECMWF, UK Met Office поставлялись 4 раза в сутки или даже приводились только полуденные распределения (UK Met Office). Недавно появились новые данные ретроспективного анализа MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) [7], которые поставляются каждые три часа, то есть позволяют рассматривать суточные вариации атмосферных параметров. На рисунке 1а показаны вертикальные профили среднесуточных, усреднённых за январь значений зонального ветра на широте и долготе примерно соответствующих расположению космодрома Восточный (52.5N, 129.375E) (чёрная линия), а также среднемесячные профили зонального ветра для различных моментов ло-

кального времени (0LT, 3LT, 6LT и т.д. – цветные линии) по данным MERRA. Из рисунка видно, что, начиная с высоты порядка 55 километров, наблюдаются значительные отклонения ветра от среднесуточных значений. На высотах МНТ области эти отклонения становятся столь существенными, что рассматривать только среднесуточные значения ветра для баллистических расчётов становится бессмысленным (см. рис. 1b, построенный аналогичным образом по модели HWM07 до высоты 120 километров).

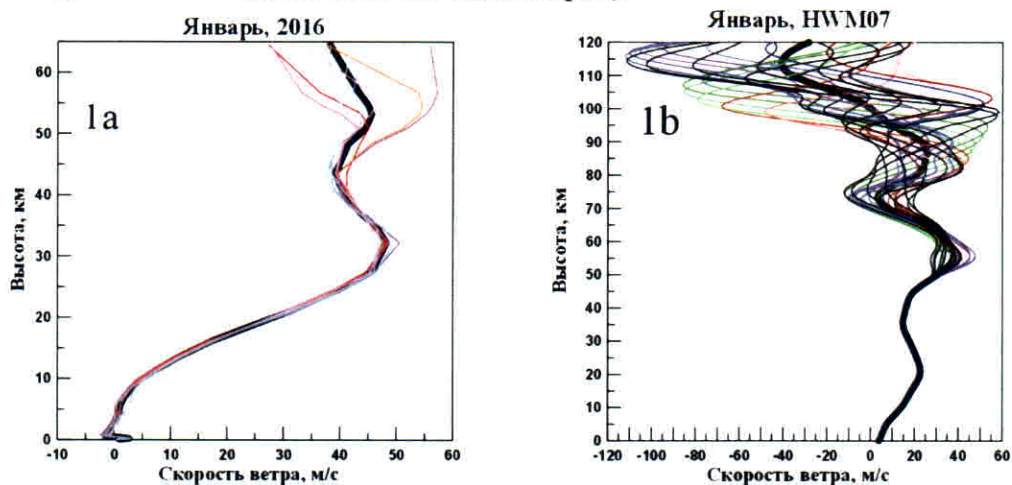


Рис 1. Вертикальные профили среднесуточных, усреднённых за январь значений зонального ветра на широте и долготе вблизи космодрома Восточный (52.5N, 129.375E) (черная линия) по данным MERRA (1a) и по модели HWM07 (1b); среднемесячные профили зонального ветра для различных моментов локального времени показаны цветными линиями

Суточные вариации ветра по данным MERRA и модели HWM07. На рисунке 2 представлены суточные вариации зонального (красные линии) и меридионального (синие линии) ветра в точке с координатами (52.5N, 129.375E) на высоте 65 километров для основных сезонов (январь – 2a, апрель – 2b, июль – 2c и октябрь – 2d). Сплошными линиями показаны результаты, полученные по модели HWM07, штрихами – по данным MERRA для 2015 и 2016 годов. Из рисунка видно, что зимой и осенью преобладают полусуточные вариации ветра, а весной и летом доминируют суточные колебания. В целом модель HWM07 лучше согласуется с данными ре-анализа MERRA по меридиональному ветру, по зональному ветру лучшее согласие наблюдается для периодов равноденствия. По фазе суточных колебаний согласие лучше, чем по амплитуде. Аналогичное различие наблюдается при сравнении результатов, полученных с использованием моделей HWM07 и EMMA (Мерзляков Е.Г., частное сообщение) – амплитуды суточных колебаний ветра в области МНТ по модели HWM07 существенно превосходят амплитуды, полученные с использованием модели EMMA.

Внутри-сезонные вариации суточных колебаний ветра. Рисунки 1 и 2 дают представление о климатических суточных вариациях ветра и их зависимости от сезона. Однако суточные колебания ветра могут испытывать существенные внутри-сезонную изменчивость (особенно в зимний период). На рисунке 3 показана изменчивость среднезонального потока на широте 52.5N в январе-феврале 2017 года по данным MERRA (верхний рисунок). В конце января наблюдается обращение циркуляции во время события внезапного стратосферного потепления (ВСП), и наблюдаемый зональный поток существенно отличается от климатических значений. На нижнем рисунке 3 показано локальное изменение зонального ветра над космодромом Восточный за тот же интервал времени. Из этого рисунка видно, что на высотах 40–60 километров наблюдаются заметные суточные вариации. Для оценки внутри-сезонной изменчивости амплитуд суточных вариаций зонального ветра над космодромом Восточный были рассчитаны амплитудные вейвлет спектры для зональных гармоник с волновыми числами $m = 1$ и 2 , полученными из данных MERRA. При расчётах использовалось комплексное вейвлет преобразование Морле.

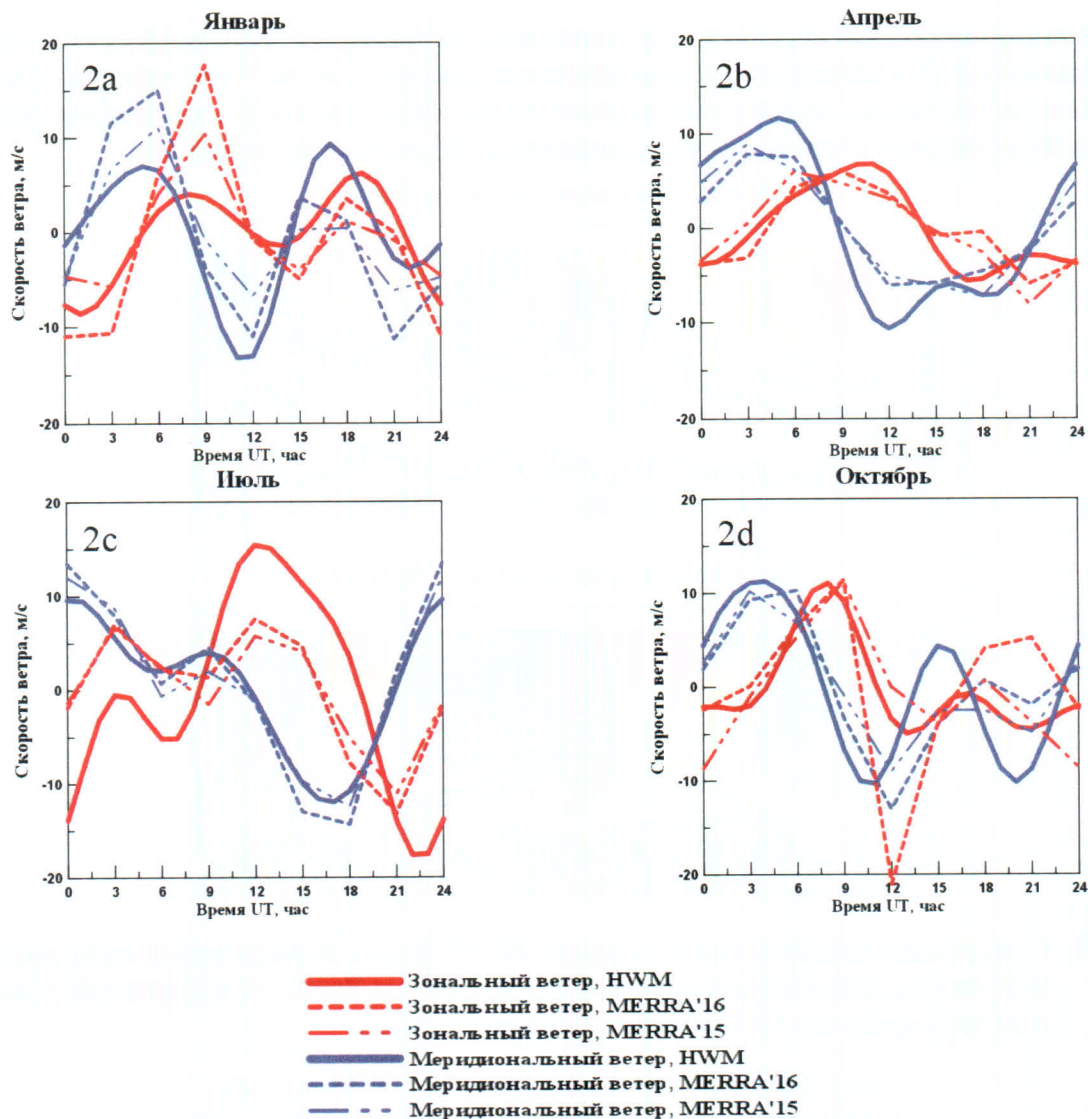


Рис 2. Суточные вариации зонального (красные линии) и меридионального (синие линии) ветра на высоте 65 км в районе космодрома Восточный для основных сезонов; сплошными линиями показаны результаты, полученные по модели HWM07, штрихами – по данным MERRA для 2015 и 2016 годов

Полученные результаты для распространяющихся на запад волн в зональном потоке показаны на рисунке 4. Верхний рисунок соответствует волне с зональным числом $m = 1$, нижний с $m = 2$. Из рисунка видно, что в суточных колебаниях зонального ветра преобладают мигрирующие приливы, то есть для $m = 1$ – суточные колебания, для $m = 2$ – полусуточные.

В конце января (во время события ВСП) наблюдается существенное ослабление мигрирующего суточного прилива и практически исчезновение полусуточного. Это связано с нелинейным взаимодействием мигрирующих приливов со стационарной планетарной волной с $m = 1$ (СПВ1), которая усиливается во время ВСП, и генерацией немигрирующих приливов (суточного с $m = 2$ и полусуточного с $m = 1$). Усиление этих приливов можно отметить на рисунке 4. В целом следует отметить, что такие нелинейные взаимодействия приводят к существенной модуляции амплитуд суточных колебаний ветра. Эта модуляция наиболее значима в зимний сезон, когда в стратосфере наблюдается значительная амплитуда СПВ1.

Выводы. На высотах верхней стратосферы и в МНТ области суточные вариации горизонтального ветра становятся преобладающими (особенно для меридиональной составляющей) и их необходимо учитывать при построении справочной модели атмосферы на этих высотах. Амплитуды суточного и полусуточного атмосферных приливов испытывают суще-

ственные внутри-сезонные вариации, обусловленные нелинейным взаимодействием с планетарными волнами. В климатических эмпирических моделях эту внутри-сезонную изменчивость учесть невозможно, поэтому необходимо также развивать численные модели циркуляции средней атмосферы с привлечением (ассимиляцией) данных наблюдений.

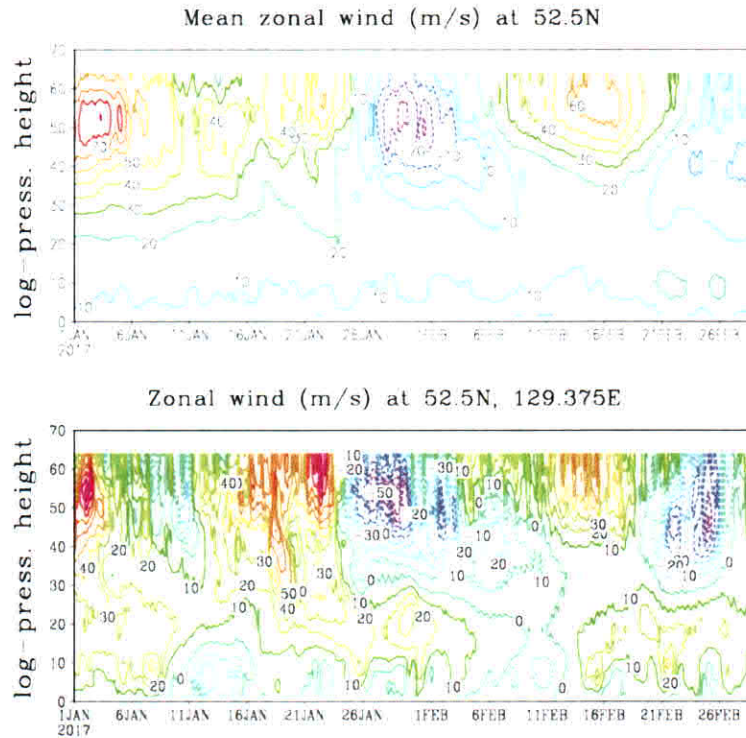


Рис. 3. Среднезональный поток на широте 52.5N (верхний рисунок) и локальные изменения зонального ветра над космодромом Восточный (нижний рисунок) в январе-феврале 2017 года по данным MERRA

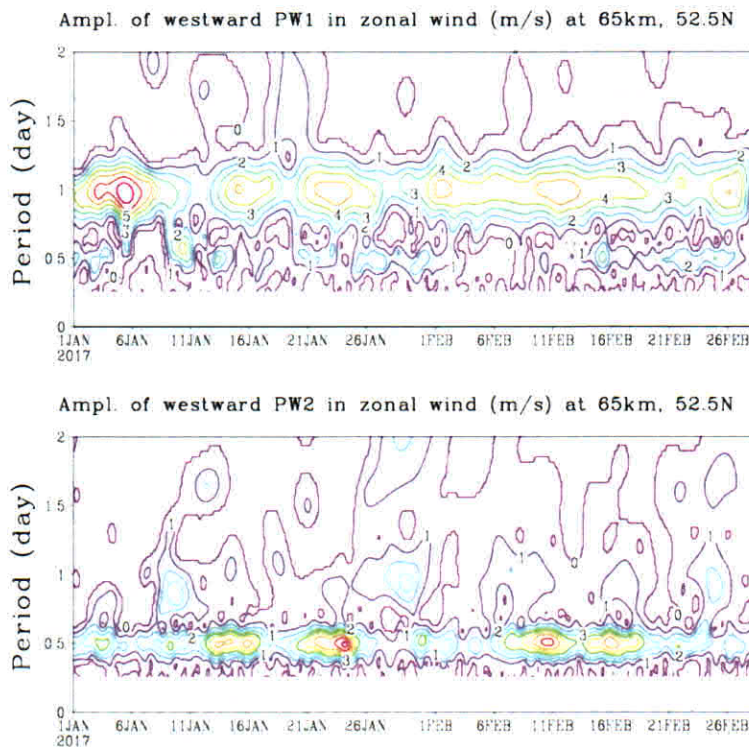


Рис. 4. Вейвлет амплитуды для распространяющихся на запад глобальных волн в зональном ветре на широте 52.5N и высоте 65 км для зональных гармоник с $m = 1$ и 2 в январе-феврале 2017 года

ЛИТЕРАТУРА

1. Глобальная справочная модель атмосферы на высотах от 0 до 100 километров для баллистического обеспечения ракетно-космической практики / Электронный ресурс: http://www.russian.space/media/files/spravocnaa_model2.pdf, дата обращения 14.03.2017 г.
2. Мерзляков Е.Г., Соловьева Т.В. Программа расчёта значений горизонтальных скоростей ветра на высотах 15–100 км на основе среднеголетних среднемесячных данных наземных и спутниковых наблюдений / Программа для ЭВМ, свидетельство о регистрации № 2015613309 от 18.06.2015 г.
3. Портнягин Ю.И., Соловьева Т.В., Мерзляков Е.Г., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Высотно-широтная структура вертикального ветра в области верхней мезосферы и нижней термосферы (70–110 км) / Известия РАН. Физика атмосферы и океана, № 1, т. 46, 2010. – с. 1–10.
4. Мерзляков Е.Г., Портнягин Ю.И., Соловьева Т.В., Погорельцев А.И., Суворова Е.В. Высотно-широтная структура вертикальной компоненты ветра мигрирующего суточного прилива в области высот 80–100 км / Известия РАН. Физика атмосферы и океана, № 2, т. 48, 2012. – с. 195–206.
5. COSPAR International Reference Atmosphere CIRA-2012. Rev.-01-11-08-2012. http://spaceweather.usu.edu/files/uploads/PDF/COSPAR_INTERNATIONAL_REFERENCE_ATMOSPHERE-CHAPTER-1_3%28rev-01-11-08-2012%29.pdf.
6. Drob D.P., J.T. Emmert, G. Crowley, J.M. Picone, G.G. Shepherd, W. Skinner, P. Hays, R.J. Nijcejewski, M. Larsen, C.Y. She, J.W. Meriwether, G. Hernandez, M.J. Jarvis, D.P. Sipler, C.A. Tepley, M.S. O'Brien, J.R. Bowman, Q. Wu, Y. Murayama, S. Kawamura, I.M. Reid, R.A. Vincent. (2008), An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07// J. Geophys. Res., 113, A12304, doi:10.1029/2008JA013668.
7. Rienecker, M.M., et al. (2011), MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications// J. Climate, 2011, V. 14, P. 3624–3648. doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМАКОВА Татьяна Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «РГГМУ», тел. (812) 633-01-74, e-mail: taalika@mail.ru

МОЦАКОВ Максим Анатольевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ФГБОУ ВО «РГГМУ», тел. (812) 633-01-74, e-mail: maxm@rshu.ru

ПОГОРЕЛЬЦЕВ Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО «РГГМУ», тел. (812) 633-01-74, e-mail: apogor@rshu.ru

ФОМИН Александр Николаевич – магистр ФГБОУ ВО «РГГМУ», тел. (812) 633-01-74, e-mail: F.omi.n@yandex.ru