

7. Lin H, Brunet G, Derome J. An observed connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian Oscillation // *J. Climate*. 2004. V. 22. P. 364–380.
8. Koster R.D., Mahanama S.P.P., Yamada T.J., Balsamo G., Berg A.A., Boisserie M., Dirmeyer P.A., Doblas-Reyes F.J., Drewitt G., Gordon C.T., Guo Z., Jeong J.-H., Lawrence D.M., Lee W.-S., Li Z., Luo L., Malyshev S., Merryfield W.J., Seneviratne S., Stanelle T., van den Hurk B.J.J.M., Vitart F. 2011. The contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 37. P. L02402
9. Демченко П.Ф., Кислов А.В. Стохастическая динамика природных объектов. Броуновское движение и геофизические примеры – М.: ГЕОС, 2010. – 190 с.
10. Vitart F. Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 2014. V. 140 P.1889-1899.
11. Jung, T., Miller M.J., Palmer T.N., Towers P., Wedi N., Achuthavarier D., Adams J.M., Altshuler E.L., Cash B.A., Kinter J.L., Marx L., Stan C., and Hodges K.I. High-Resolution Global Climate Simulations with the ECMWF Model in Project Athena: Experimental Design, Model Climate, and Seasonal Forecast Skill // *J. Climate*, 2012. V. 25, P. 3155–3172
12. Scaife A., Arribas A., Blockley E., Brookshaw A., Clark R. T., Dunstone N., Eade R., Fereday D., Foland C. K., Gordon M., Hermanson L., Knight J. R., Lea D. J., MacLachlan C., Maidens A., Martin M., Peterson A. K., Smith D., Vellinga M., Wallace E., Waters J., and Williams A. Skillful long-range prediction of European and North American winters // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V.41. P.2514-2519.
13. Dunstone N., Smith D., Scaife A., Hermanson L., Eade R., Robinson N., Andrews M., Knight J. Skillful predictions of the winter North Atlantic Oscillation one year ahead // *Nature Geoscience* 2016, V 9, P. 809–814.
14. Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostykin S.V., Fadeev R.Y., Shashkin V.V., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Mityak V.G., Shlyayeva A.V., Geleyn J.-F., Ezau I.N., Yurova A.Y. Development of the multiscale version of the SLAV global atmosphere model // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015. V 40 P. 374-382.
15. Ibrayev R. A., Ushakov K. V., and Khabeev R. N. Eddy-resolving 1/10° model of the World Ocean // *Izvestia, Atmos. Ocean. Phys.* 2012 V 48, No. 1, P. 37–46.
16. <http://oceans11.lanl.gov/trac/CICE/attachment/wiki/WikiStart/cicedoc.pdf?format=raw>
17. Fadeev R. Yu., Ushakov K. V., Kalmykov V. V., Tolstykh M. A. , and Ibrayev R. A. Coupled atmosphere-ocean model SLAV-INMIO: implementation and first results // *Russian J. Num. An. and Math. Mod.* 2016. V.31 P. 329-337.
18. ALADIN operational physics documentation (2005). Part 4 Subgrid dynamical processes // <http://www.umr-cnrm.fr/gmapdoc/spip.php?article12>
19. Hines C.O. Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere // *J. Atm. Solar-Terr. Physics*, 1997. V. 59, P. 371-386.
20. Dee D. P., 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., 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 I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J., Park B., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J. and Vitart F. The ERA - Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011, V.137. P. 553-597.

Changes of thermodynamic characteristics in the troposphere and stratosphere in 1979–2016

Y.P. Perevedentsev, K.M. Shantalinsky, V.V. Guryanov, A.V. Eliseev

Kazan Federal University, Kazan, Russia
E-mail: ypereved@kpfu.ru

In this paper, a number of thermodynamic characteristics in the Northern middle latitudes (30–65°N) are estimated based on the ERA-Interim reanalysis for 1979–2016 with an emphasis on three sectors: Atlantic-European (I), Asian-Pacific (II), and American (III).

For all seasons, coefficients of linear trends for temperature strongly depend on season. Such coefficients are positive in the troposphere (warming in 1979–2016). In the summer stratosphere and in the lower mesosphere, these coefficients are negative with the magnitudes much exceeding those in the troposphere (e.g., the trend slope is equal to -0.9 °C/decade).

Temperature changes in the vertical depend on longitudinal sector. In winter, in the troposphere in sector I, temperature is larger than the zonal mean temperature (ZMT) by 3°C, in the layer 10-35 km in the same sector, it is smaller by 4.5 °C, and in the layer 35-64 km is again larger than ZMT by 3.5 °C. This is in contrast with sector II, where in the troposphere temperature is by 4 oC smaller in comparison to ZMT, in the layer 10-40 km the temperature is warmer relative to ZMT, and in the upper stratosphere and in the mesosphere is colder than ZMT at the same altitudes. In sector III the signs of the temperature differences from ZMT are similar to those in sector I, but with smaller magnitudes. In summer, such layering is not so pronounced.

Maximum values (up to $13 \cdot 10^{-6}$) of the ozone mass maxing ratio (OMMR) in the Northern middle latitudes are found at latitudes from 31 to 34 km in summer. The largest annual cycle-related OMMR anomalies (up to $0.4 \cdot 10^{-6}$) are found from November to January in sector II in the layer with altitudes from 15 to 35 km. In sector I, in contrast, OMMR is negative in the same months and at the same latitudes.

We calculated characteristics of the waves in geopotential heights. We found that energy of the wave of all types (E: eastward travelling, W: westward travelling, S: stationary) is correlated in the extratropical middle atmosphere with the quasi-biennial oscillation in the equatorial zonal wind speed at the 50 hPa level. Wave energy for E-waves is positively correlated with the Arctic Oscillation (AO) index in the extratropical troposphere and stratosphere. W-waves energy is positively correlated with the AO index in the troposphere to the south of 60°N and negatively correlated with this index to the south of 60°N.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-05-00721).

Изменения термодинамических характеристик в тропо- стратосфере в период 1979–2016 гг.

Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В., Елисеев А.В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

E-mail: ypereved@kpfu.ru

В работах [6,7] дано описание пространственно-временной изменчивости полей атмосферного давления, температуры воздуха и скорости ветра в период 1900-2014 гг., что позволило выявить долгопериодные тенденции метеорологических величин на различных изобарических поверхностях в тропосфере. В последние годы в связи с развитием измерительных и информационных технологий стало возможным более детально изучать процессы происходящие в более высоких слоях атмосферы. К числу наиболее актуальных проблем следует отнести изучение динамического взаимодействия тропосферы и стратосферы, возникновения внезапных стратосферных потеплений, волновой активности, трендов температуры в стратосфере и др. [1].

Таблица 1. Характеристики низкочастотной изменчивости средних температур умеренной зоны Северного полушария на 26 изобарических поверхностях.

Уровень, гПа	Январь			Июль		
	Av. °C	σ. °C	A, °C/год	Av. °C	σ. °C	A, °C/год
1000	-0,60	0,64	0,026	19,54	0,40	0,028
925	-3,77	0,56	0,026	16,38	0,45	0,031
850	-5,87	0,51	0,024	12,97	0,44	0,028
700	-12,33	0,45	0,021	4,19	0,39	0,022
600	-18,98	0,42	0,018	-2,97	0,40	0,023
500	-27,59	0,39	0,017	-11,63	0,42	0,023
400	-38,53	0,36	0,016	-23,00	0,44	0,022
300	-50,60	0,37	0,018	-37,97	0,50	0,027
250	-54,98	0,46	0,018	-45,90	0,49	0,024
200	-56,16	0,55	0,014	-51,28	0,49	0,013
150	-56,34	0,50	0,013	-55,05	0,45	0,005
100	-59,22	0,50	0,005	-58,29	0,53	-0,013
70	-60,19	0,71	-0,005	-56,86	0,62	-0,026
50	-59,88	1,01	-0,009	-53,95	0,59	-0,032

Уровень, гПа	Январь			Июль		
	Av, °C	σ, °C	A, °C/год	Av, °C	σ, °C	A, °C/год
30	-58,49	1,38	-0,009	-49,62	0,55	-0,030
20	-56,51	1,46	-0,002	-45,31	0,48	-0,025
10	-50,89	1,68	0,016	-37,14	0,44	-0,021
7	-45,01	1,78	-0,030	-32,02	0,45	0,016
5	-38,69	1,96	-0,073	-26,24	0,59	0,029
3	-31,21	2,16	-0,054	-14,51	1,02	-0,063
2	-27,35	2,88	-0,046	-7,38	1,37	-0,090
1	-22,50	3,04	-0,023	-3,98	1,65	0,046
0,8	-21,14	3,09	-0,010	-4,60	1,92	0,085
0,51	-19,47	3,36	0,023	-10,39	2,13	0,113
0,29	-22,82	3,27	0,041	-24,30	1,89	0,078
0,1	-34,44	2,52	-0,001	-51,25	1,66	-0,032

В докладе с использованием данных реанализа ERA-Interim [4] рассчитывался ряд термодинамических характеристик для умеренной зоны (65–30° с.ш.) Северного полушария (СП) и его 3-х секторов: Атлантико-Европейского (I), Азиатско-Тихоокеанского (II) и Американского (III). В табл. 1 представлено распределение по вертикали средних многолетних значений температуры воздуха AV (°C) и величины наклона линейных трендов A (°C/год) на 26 изобарических поверхностях для всей умеренной зоны. Осредненные данные по умеренной зоне как для января, так и июля показывают понижение температуры с высотой в тропосфере, ее рост в стратосфере и вновь понижение в мезосфере. Отмечается ее значительный годовой ход, включая и верхние слои атмосферы. Коэффициенты наклона линейного тренда (КНЛТ) свидетельствуют о неоднородном характере изменения температуры во времени на различных уровнях. В тропосфере КНЛТ положительны, что свидетельствует о ее потеплении в период 1979–2016 гг., в летней стратосфере и нижней мезосфере понижение температуры происходило более интенсивно, чем в зимней. Так, на уровне 2 гПа в июле КНЛТ = -0,9°C/10 лет. Таким образом, происходит расслоение атмосферы по ее отклику на глобальное потепление климата.

Анализ высотно-временных разрезов первых разностей низкочастотных компонент (НЧК) с периодом более 10 лет температуры (°C/год) в январе и июле показал следующее. Процессы наиболее активно в январе происходят в слое 40–64 км, что проявляется в последующем чередовании отрицательных и положительных очагов НЧК с периодом 6–8 лет. При этом с 1996 по 2008 г. на уровне 42 км перепад температуры составил 7°C. В нижней мезосфере знак очагов меняется на противоположный. В июле практически ярких перепадов температуры не отмечается. Межгодовые изменения происходят незаметно. Периоды с незначительными повышениями температуры сменяются на противоположные.

При рассмотрении НЧК озона наблюдается достаточно активная динамика в январе и особенно июле в слое 15–45 км, где происходит последовательная смена знака очагов НЧК с положительной и отрицательной тенденцией на протяжении 38 рассматриваемых лет.

С целью оценки влияния физико-географических факторов, состояния подстилающей поверхности и циркуляционных процессов на термический режим 3-х естественно-синоптических секторов умеренной зоны Северного полушария рассчитывались разности осредненных температур этих секторов и всей умеренной зоны СП. Расчеты велись в слое атмосферы от уровня Земли до 64 км высоты для каждого месяца. Анализ полученных высотно-временных разрезов показал, что в I секторе в тропосфере температура на 3°C выше, чем всей умеренной зоны, в слое 10–35 км зимой, наоборот, происходит ее заметное понижение (на 4,5°C), в более высоких слоях атмосферы происходит повышение температуры (~ на 3,5°C) относительно зоны. Во втором секторе наблюдается противоположная картина: зимой в тропосфере температура воздуха на 4°C ниже, чем в зоне, в слое 10–40 км наблюдается интенсивная аномалия температуры (+6,5°C), с высоты 40 км в верхней стратосфере и нижней мезосфере вновь температура понижается. В третьем секторе аномалии температуры менее интенсивны: зимой в слое Земля–20 км теплее, чем в зоне, в слое 25–55 км температура значительной ниже (на 4°C) и в нижней мезосфере, как и в тропосфере, она вновь повышается относительно всей умеренной зоны. В летний период процессы не столь выражены. Таким образом, выявляется чередование положительных и отрицательных отклонений температуры воздуха по вертикали, особенно ярко выраженных в Азиатско-Тихоокеанском секторе (рис. 1).

Максимальные значения МДО в умеренной зоне отмечаются в слое 31–34 км в июле–августе, где эта величина достигает $13 \cdot 10^{-6}$, в зимний период (декабрь–февраль) порядка $12 \cdot 10^{-6}$. Результаты анализа показывают, что во втором секторе в слое 15–35 км в холодный период наблюдаются наибольшие положительные отклонения $0,4 \cdot 10^{-6}$ в содержании озона относительно всей зоны. Контрасты наиболее вели-

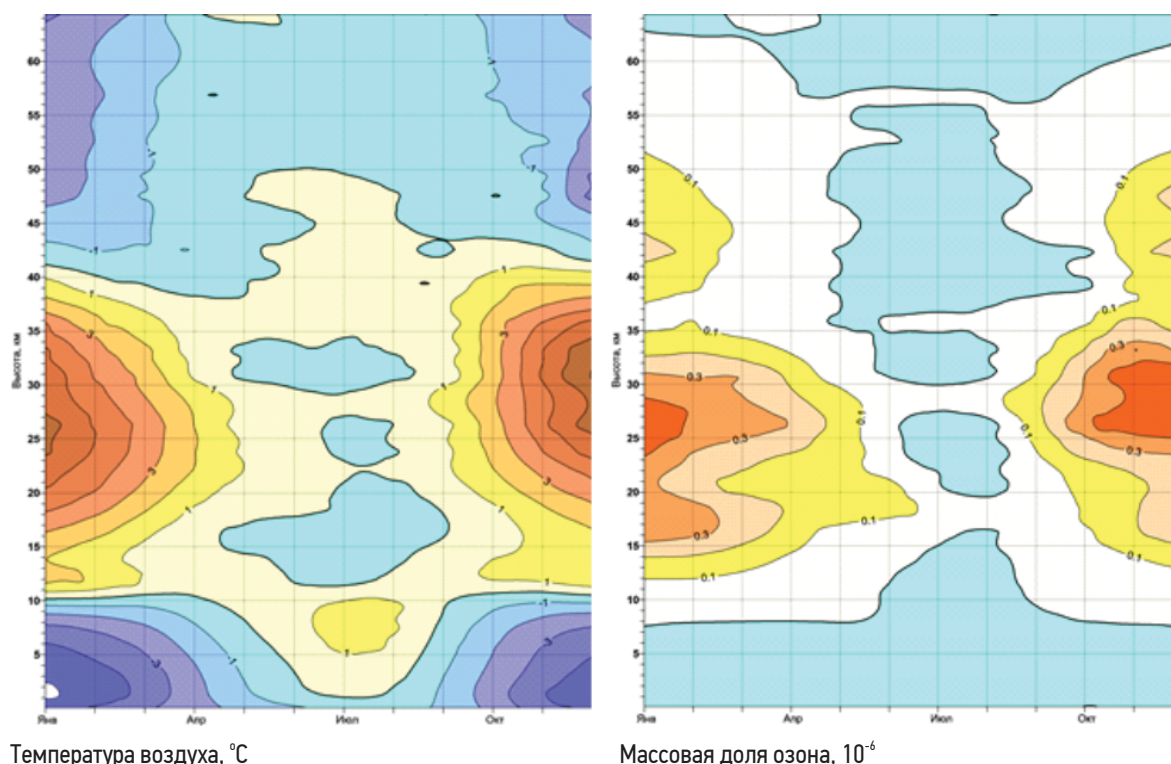


Рис. 1. Разности температуры воздуха и массовой доли озона осредненных по территории Азиатско-Тихоокеанского сектора умеренной зоны СП и по всей умеренной зоне.

ки в ноябре-январе, в июле-августе аномалия МДО отрицательная. В I секторе, наоборот, на этих высотах отмечается отрицательная аномалия массовой доли озона. По-видимому, существует физический механизм, способствующий созданию потепления и повышения концентрации озона в Азиатском секторе.

Для оценки степени взаимосвязанности соседних изобарических поверхностей в умеренной зоне рассчитывались коэффициенты корреляции между температурами воздуха для года в целом, января и июля. В тропосфере связи между уровнями тесные, они заметно ослабевают при переходе через тропопазу особенно в летний период (в июле между уровнями 200 и 150 гПа $r = 0,615$). И если в январе в стратосфере и мезосфере межуровневые корреляционные связи также тесные, то в июле в верхней стратосфере и нижней мезосфере отмечается ряд случаев, когда коэффициенты корреляции невелики. Так, коэффициент корреляции температуры между уровнями 7 и 5 гПа составляет 0,097, т.е. незначим. В зимний период благодаря активному динамическому взаимодействию атмосфера более однородная, чем летом, когда на передний план выступают радиационные и фотохимические факторы.

Рассчитанные коэффициенты вертикальной автокорреляции температуры для января и июля показывают следующее: в январе значения коэффициента корреляции (r) быстро уменьшаются в тропосфере, при переходе через тропопазу происходит смена знака r , но в целом связи между тропосферными и стратосферными уровнями достаточно слабые. Величина r меняется от -0,2 до 0,2. Ситуация в корне меняется летом. В тропосфере между уровнями связи высокие. Коэффициент r уменьшается к тропопазе от 1 до 0,8, затем с высотой при переходе через тропопазу величина резко уменьшается и меняет знак. Корреляционная связь тропосферы и стратосферы имеет волновой характер в зависимости от высоты. Выделяется уровень 20 км, где $r = -0,6$, уровень 33 км, где $r = 0,4$, уровень 37 км ($r = -0,5$), уровень 50 км ($r = 0,6$). Если рассматривать связи в стратосфере (нижней и верхней), то здесь в январе коэффициенты корреляции плавно уменьшаются и на уровне 40 км меняют знак на отрицательный. В июле связи с высотой ослабевают, но в основном $r > 0$. Согласно данным рис 1. происходит смена теплых и холодных слоев атмосферы. Коэффициенты корреляции, рассчитанные для января, подтверждают это. Так, смена знака r на уровне 40 км свидетельствует о том, что процессы, способствующие нагреванию стратосферы, могут приводить к выхолаживанию мезосферы. Волнообразный характер величины r связан с волнообразным характером некоторых процессов передачи возмущений из нижних слоев в верхние. Так, в работе [3] отмечен волнообразный характер вертикальных отклонений температуры от среднего состояния. В работе [2] рассмотрена волновая активность в тропо- стратосфере Северного полушария зимой в 1979 – 2016 гг. Здесь представлены результаты выявленных статистических взаимосвязей компонент спектра Хаяши [5] выделенных волн, распространяющихся на восток (E), на запад (W) и стационарных (S) с индексами изменчивости климата.

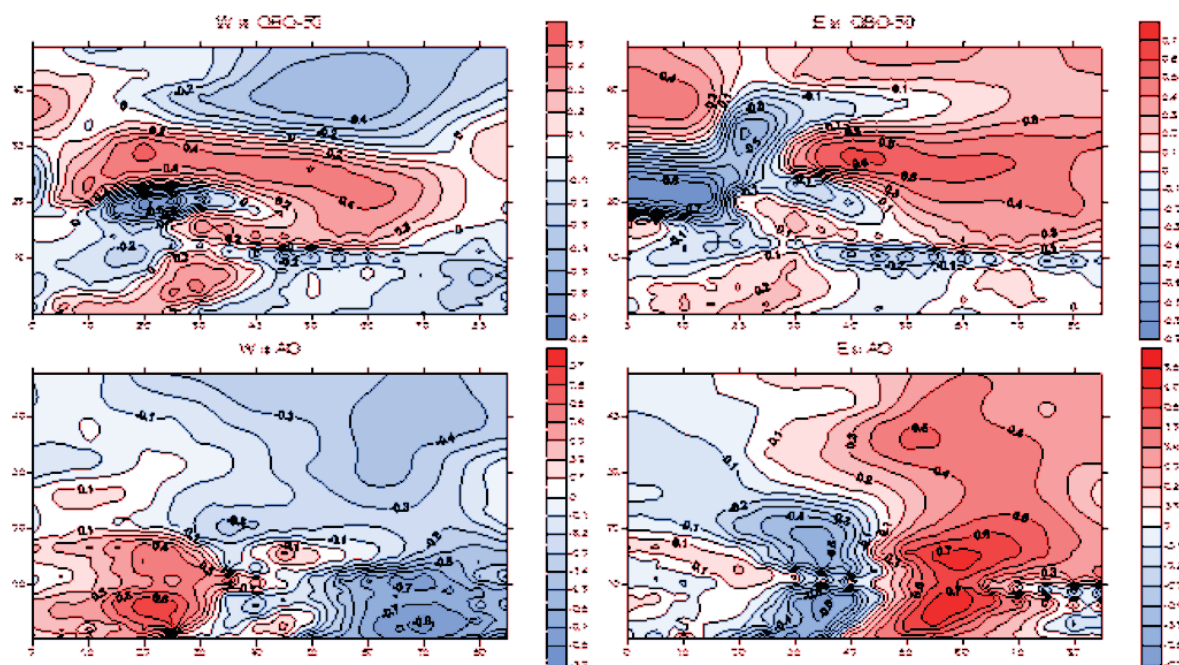


Рис. 2. Высотно-широтное распределение корреляций интегральных спектров W и E с индексами QBO-50 и AO за 1979-2016 гг.

На рис. 2 представлены высотно-широтные распределения корреляций W и E компонент с индексами АО (арктическая осцилляция) и QBO-50 (индекс зонального ветра на 50 гПа). Для корреляции с квазидвухлетней цикличностью, представленной индексом QBO-50, выделяется очаг высоких значимых положительных связей в средней атмосфере внетропических широт для всех типов волн. Связи выше для волн типа E. Выделяется обширная область значимых отрицательных связей в верхней стратосфере внетропических широт для волн W. Отрицательный характер связи согласуется с известным фактом [3] о том, что сильные стратосферные потепления (возмущения поля температуры) чаще происходят при восточной фазе квазидвухлетнего цикла.

Высотно-широтные распределения корреляций волновых компонент с индексом АО существенно различаются для волн W и E. Наиболее тесные положительные связи отмечаются для волн E с индексом АО в тропосфере умеренных широт и большей части стратосферы внетропических широт с максимальными значениями (0,7-0,8) на 55-60° с.ш. в нижней стратосфере. Распределения корреляций для волн W имеют, в известной степени, обратный характер: отрицательные корреляции (-0,7-0,8) в тропосфере к северу от 60° с.ш. и положительные (0,7-0,8) в тропосфере низких широт.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-05-00721).

Литература:

1. Варгин П.Н., Володин Е.М., Карпечко А.Ю., Погорельцев А.И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях / Вестник РАН. – 2015. – Т. 85. – № 1. – С. 39-46.
2. Гурьянов В. В., Елисеев А. В., Мохов И. И., Переведенцев Ю. П. Волновая активность и ее изменения в тропосфере и стратосфере Северного полушария зимой в 1979-2016 гг. // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана, 2018, том 54, № 2, с. 133–146.
3. Метеорология верхней атмосферы Земли / Под ред. Г.А. Кокина, С.С. Гайгерова. Л., Гидрометеиздат, 1981, 270 с.
4. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. The ERAInterim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J. Roy. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. № 656. P. 553–597.
5. Hayashi Y. A generalized method of resolving disturbances into progressive and retrogressive waves by space Fourier and time cross-spectral Analyses // J. Meteorol. Soc. Japan. 1971. V. 49. № 2. P. 125–128.
6. Perevedentsev Y.P., Shantalinskii K.M. Estimation of contemporary observed variations of air temperature and wind speed in the troposphere of the Northern Hemisphere / Russian Meteorology and Hydrology. – 2014. – Vol. 39. – Iss. 10. – pp. 650-659.
7. Perevedentsev Y.P., Vasilev A.A., Shantalinskii K.M., Guryanov V.V. Long-term variations in surface air pressure and surface air temperature in the northern hemisphere mid-latitudes / Russian Meteorology and Hydrology. – 2017. – Vol. 42. – Iss. 7. – pp. 461-470.