

**М.М. Махамбетова<sup>1\*</sup>**, **Н.Н. Абаев<sup>1,2</sup>**, **А.С. Нысанбаева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Әл-Фараби ат. Қазақ Ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup>«ҚАЗГИДРОМЕТ» РМК, Қазақстан, Алматы қ.

\*e-mail: miyuki\_shitsui@mail.ru

## АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНДА РЕАНАЛИЗ МӘЛІМЕТТЕРІ БОЙЫНША МЕТЕОРОЛОГИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРДІҢ ВЕРТИКАЛЬДІ ТАРАЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Метеорологиялық элементтердің кеңістіктік таралуын қарастырғанда тек жер беті деңгейін ғана емес, сонымен қатар еркін атмосферадағы таралуын да ескеру керек. Метеошамалардың биіктік бойынша таралуының өзгерісін тәулік ішінде, сондай-ақ, айлық, жылдық және ғасырлық масштабта қарастыру аса маңызды. Метеорологиялық элементтерінің атмосферада вертикальді таралуын бақылау метеорологияның көптеген салаларында, мысалы, авиацияда, синоптикада, климатологияда кең қолданылатын ақпарат болып келеді. Оның ішінде, жаһандық климаттың өзгерісін зерттейтін салада елеулі үлесін қосатын дерек. Дегенмен, қазіргі таңдағы еркін атмосферада радиозондтық барлау жүргізетін станциялардың тым аз болуынан маңызды ақпаратпен қамту қажетті деңгейде жүріп жатқан жоқ. Сондықтан да, өткен ғасырдың 90-шы жылдарында осы мәселені шешу үшін шетел ғалымдары реанализ әдісін қолдана бастады. Мақалада Алматы қаласы бойынша ауа температурасы, салыстырмалы ылғалдылық және жел жылдамдығы метеорологиялық элементтерінің 2012-2019 жылдар аралығы үшін өзгеру тенденциясы бақыланды. Зерттеу нәтижесінде бақылау жүргізілген стандартты изобаралық беткейлерде (925-100 гПа) метеорологиялық шамалардың ERA5 реанализ арқылы алынған деректері радиозондылау ақпаратынан айырмашылықтары рұқсат етілген аралықта ауытқитындығы айқындалды. Ауа температурасы үшін реанализ бен радиозондылау ақпараттары арасындағы корреляциялық байланыс өте жақсы болды (0,9), салыстырмалы ылғалдылық пен жел жылдамдығы үшін де корреляциялық коэффициент жоғары болды (0,6-0,9). Үш метеошама үшін нормаланған ауытқу (НА) мен нормаланған орташа абсолютті қате (НОАҚ) биіктік бойынша 0,00-0,05 аралығында өзгерді. Ал нормаланған орташа квадраттық қате (НОКК) 0,00-0,26 аралығында болды. Зерттеу нәтижелері бойынша ERA5 реанализ мәліметтерін берілген аймақта метеорологиялық параметрлердің биіктік бойынша таралуын зерттеуде пайдалануға болатындығы анықталды.

**Түйін сөздер:** ауа температурасы, салыстырмалы ылғалдылық, жел жылдамдығы, корреляциялық байланыс, радиозонд, реанализ, ERA5.

M.M. Makhambetova<sup>1\*</sup>, N.N. Abaev<sup>1,2</sup>, A.S. Nysanbayeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>RSE «KazHydroMet», Kazakhstan, Almaty

\*e-mail: miyuki\_shitsui@mail.ru

### Features of the vertical distribution of meteorological parameters according to reanalysis data on the example of the city of Almaty

When considering the spatial distribution of meteorological elements, it is necessary to take into account not only the level of the Earth's surface, but also the distribution in the free atmosphere. It is very important to consider the change in the distribution of meteorological elements by height during the day, as well as on a monthly, annual and secular scale. Observations of the vertical distribution of meteorological elements in the atmosphere are information widely used in many fields of meteorology, for example, in aviation, weather forecasting, climatology. In particular, it is used in the field of studying global climate change. However, at present, due to the too small number of stations conducting radiosonde exploration in the free atmosphere, the coverage of important information is not at the proper level. Therefore, in the 90s of the last century, foreign scientists began to use the method of reanalysis to solve this problem. The article traces the trend of changes in meteorological elements of temperature, relative humidity and wind speed in Almaty for the period from 2012 to 2019. As a result of the study, it was found that on standard isobaric slopes (925-100 hPa), where observations were carried out, the data of meteorological values obtained by ERA5 reanalysis diverge from the radiosounding information within acceptable limits. The correlation between the reanalysis and radiosounding data was ideal for air temperature (0.9), and the correlation coefficient was high for both relative humidity and wind speed (0.6-0.9).

For three weather conditions, the normalized deviation (NO) and the normalized average absolute error (NSAO) varied in the range of 0.00-0.05 in height. And the normalized mean square error (NSC) was in the range of 0.00-0.26. According to the results of the study, it was found that the ERA5 reanalysis data can be used to study the distribution of meteorological parameters by height in a given area.

**Key words:** air temperature, relative humidity, wind speed, correlation, radiosonde, reanalysis, ERA5.

М.М. Махамбетова <sup>1\*</sup>, Н.Н. Абаев <sup>1,2</sup>, А.С. Нысанбаева <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>РГП «ҚазГидроМет», Казахстан, г. Алматы

\*e-mail: miyuki\_shitsui@mail.ru

### Особенности вертикального распределения метеорологических параметров по данным реанализа на примере города Алматы

При рассмотрении пространственного распределения метеорологических элементов следует учитывать не только уровень поверхности Земли, но и распределение в свободной атмосфере. Очень важно рассмотреть изменение распределения метеозаэlements по высоте в течение суток, а также в месячном, годовом и вековом масштабах. Наблюдения за вертикальным распределением метеорологических элементов в атмосфере представляют собой информацию, широко используемую во многих областях метеорологии, например, в авиации, синоптике, климатологии. В том числе, ее используют в сфере по изучению глобального изменения климата. Тем не менее, в настоящее время из-за слишком малого количества станций, ведущих радиозондовую разведку в свободной атмосфере, охват важной информацией не идет на должном уровне. Поэтому в 90-х годах прошлого века для решения этой проблемы зарубежные ученые начали использовать метод реанализа. В статье прослежена тенденция изменения метеорологических элементов температуры, относительной влажности и скорости ветра по г. Алматы за период с 2012 по 2019 годы. В результате исследования установлено, что на стандартных изобарных склонах (925-100 гПа), где проводились наблюдения, данные метеорологических величин, полученные реанализом ERA5, расходятся с информацией радиозондирования в допустимых пределах. Корреляционная связь между данными реанализа и радиозондирования была идеальной для температуры воздуха (0,9), а корреляционный коэффициент был высоким как для относительной влажности, так и для скорости ветра (0,6-0,9). Для трех метеорологических нормированных отклонений (НО) и нормированной средней абсолютной ошибки (НСАО) изменялись в пределах 0,00-0,05 по высоте. А нормированная средняя квадратическая ошибка (НСКО) находилась в пределах 0,00-0,26. По результатам исследования установлено, что данные реанализа ERA5 могут быть использованы при исследовании распределения метеорологических параметров по высоте в заданной области.

**Ключевые слова:** температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, корреляционная связь, радиозонд, реанализ, ERA5.

### Кіріспе

Қазіргі таңда жер бетінде аэрологиялық станцияларымен қамтамасыз етілуі нашар болғандықтан, сондай-ақ, бар станциялардағы ақпараттың толық болмауынан көптеген ғалымдар еркін атмосфераны зерттеулерінде түрлі реанализ модельдерін қолдануда.

Алғашқы реанализге ұқсас ақпараттарды талдау әдісі ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) және GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) зерттеу орталықтарында жүргізілді. Жаһандық деректерді талдау тез дами бастады, сонымен бірге болжамдардың сапасы да жақсарды. NCEP (National Centers for Environmental Prediction) өзінің алғашқы реанализ моделін жасаған кезде соған параллельді ECMWF зерттеу орталығы өзінің

алғаш ERA-15 реанализ моделін келтірген болатын (Uppala, Dee1, Kobayashi, Simmons, 2008: 2).

Метеорологиялық деректерді зерттеу ортасында реанализ модельдерінің ақпаратты қамтамасыз етуі толығымен қателіксіз деп айту қиынға түседі. Алайда, реанализ модельдері күннен күнге дамып келе жатыр және олардың көптеген түрлері өзіндік тиімді және тиімсіз қасиеттеріне ие. NCEP және ERA реанализдері климаттық модельдерді тексеру үшін жиі қолданылатын деректер жиынтығы болып келеді (Thompson, Cole, Shen, Tudhope, Meehl, 2015: 118).

Метеорологиялық ақпараттың базасы ретінде көбінесе ERA-Interim, CFSR, NCEP, ERA-Clim секілді атмосфералық реанализ модельдері алынады (Galabov, 2020: 1).

А.В. Шимарин, Ю.П. Переведенцев, М.В. Сабирова авторларының жұмысында радио-

зондылау мәліметімен қоса үш түрлі реанализ моделі қолданылған. Бұлар Era-interm, NCEP/NCAR және NCEP/DOE реанализ модельдері болып келеді. Зерттеу барысында үш ақпарат көзі салыстырылып, ең біркелкі және радиозонд мәліметіне сәйкес келетін модель, яғни Era-Interm реанализі анықталынды (Шимарин, Перевенцев, Сабирова, 2019: 5).

Зерттеуге арналған ақпараттар базасын таңдау маңызды болғандықтан, шетел ғалымдардың реанализ модельдері салыстырылған жұмыстары қарастырылды. Эрэсанья Е.О. және Гуан И. авторларының жұмысында ERA-5 және NCEP-2 реанализдері салыстырылды. Нәтижесінде, ERA-5 те, NCEP-2 де Үнді, Тынық мұхиты және Атлант мұхиттарындағы орташа маусымдық өзгерістерді анықтады. Авторлардың айтуы бойынша екі реанализдің қателіктері ұқсас болды және ақпаратпен қамтуы бірдей (Eresanya, Guan, 2021: 14).

Ал келесі мақалада ғалымдардың зерттеуі бойынша ERA-Interim реанализі ауа температурасы, жел жылдамдығы және жауын-шашын секілді метеорологиялық шамалар үшін континентальді масштабта қамтуы NCEP-NCAR реанализіне қарағанда жақсырақ екенін айтты. Бірақ, жалпы алғанда екі модельдің ұқсастығын байқап, екі реанализ моделі бірін-бірі алмастыра алатынын айтты (Fu, Charles, Timbal, Jovanovic, Ouyang, 2015: 19).

Мексиканың үстіндегі желді зерттеу жұмысында үш реанализ модельдері ERA5, ERA-Interim және MERRA-2 салыстырылды. Жұмыста ERA5 реанализінің моделі арқылы алынған ақпарат радиозондылау ақпаратымен салыстырғанда жоғары корреляциялық байланысын көрсетті деп жазылады, бірақ та жоғары корреляция болғанымен Мексика ауданы бойынша үлкен ауытқушылықты да көрсететіні айтылды. Ал қалған екі реанализ моделі ондай жоғары корреляциялық байланысты көрсетпесе де, ауытқушылығы да ондай үлкен болған жоқ деп жазады (Thomas, Nicolau, Martinez-Alvarado, Drew, Bloomfield, 2021: 12).

ERA5 пен MERRA2 реанализ модельдерін салыстырған кезде, ERA5 реанализінің ақпараты мен энергияның туындауы арасындағы корреляциялық байланыс 0,87, ал MERRA2 реанализі үшін 0,80 тең екені көрсетілді (Лубков, Сухонос, 2020: 2). Сонымен, түрлі шетелдік зерттеулерге сүйенсек, ең жақсы нәтижелер мен кең қамту аймағына ие болып ERA5 реанализ моделін санауға болады.

Берілген жұмыстың мақсаты Алматы қаласында нақты радиозондылау ақпараты мен еркін атмосфераның болжамдық моделінің, яғни ERA5 реанализ ақпараттарын қолданып тропосферада метеорологиялық элементтердің вертикальді таралу ерекшелігін салыстыру және бағалау болып келеді.

### Бастапқы мәліметтері мен әдістері

Зерттеу жұмысында Алматы қаласының (43°15.402', 76°55.716') метеорологиялық элементтерінің 2012-2019 жылдар аралығындағы уақыт қатарлары үшін статистикалық параметрлерін салыстырмалы талдау жасалынды. Статистикалық талдау үшін қолданылған бастапқы деректер [weather.uwo.edu](http://weather.uwo.edu) және [corremicus.eu](http://corremicus.eu) сайттарынан алынды.

**Радиозондылау мәліметі.** Алматы қаласының радиозондылау ақпараты келесі сайттан алынды: <http://weather.uwo.edu>.

Вайоминг университетінің радиозондылау мәліметінің архивінде он аймақ бойынша тәулігіне екі рет жасалынған бақылау ақпаратын береді. Ол аймақтарға Солтүстік Америка, Оңтүстік Америка, Оңтүстік Тынық мұхиты, Жаңа Зеландия, Антарктика, Арктика, Еуропа, Африка, Солтүстік-Шығыс Азия мен Орта Азия жатады. Бұл архивте стандартты изобаралық беттіктердегі және ерекше нүктелер деңгейлеріндегі қысым, ауа температурасы, ылғалдылық, жел жылдамдығының зоналды және меридианалды көрсеткіштерінің алқаптарына бақылау мәліметтері сақталған (<http://weather.uwo.edu>).

Зерттеуге арналған бастапқы мәлімет ретінде Алматы аэрологиялық станциясынан алынған ауа температурасы, салыстырмалы ылғалдылық және желдің жылдамдығының қатары алынды. Зерттеуде 2012-2019 жылдар аралығында 8 изобаралық беттіктердегі лездік бақылау (00 сағ. мен 12 сағ.) ақпараты қолданылды.

**Реанализ мәліметі.** Бастапқы мәлімет ретінде ERA5 жаһандық климатының атмосфералық реанализ массиві қолданылады. Есептеулер 2012-2019 жылдар кезені үшін 925 гПа-дан 100 гПа аралығындағы 8 изобарикалық беттіктерде жүргізілді.

ERA5 заманауи жаһандық атмосфералық реанализ болып табылады және оны Еуропалық орта мерзімді ауа райы болжамдарының орталығы (ECMWF) шығарады. ERA-5 өнімі тор түйіндерінің градустық ажыратымдылығында әрекет ету мүмкіндігіне ие (0,25° × 0,25° ажыратымдылық) (Полонский, Бейцер, 2021: 1).

ERA5 атмосфералық, жер беті және мұхиттық климаттық айналымының көбісіне әр сағат сайын баға беріп отырады. Бұл ақпараттар Жер шарын 30-километрлік тормен жауып, жер бетінен 80 км биіктікке дейінгі 137 деңгейлерді қамтиды. ERA5 массивінде барлық азайтылған кеңістіктік және уақыттық ажыратылымдылығы бар айналымылар үшін белгісіздіктер туралы мәліметтері табылады. ERA5 1950 жылдан бастап бүгінгі күнге дейінгі ақпаратпен қамтамасыз етеді (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>).

ECMWF зерттеу орталығының шығаратын реанализ модельдерінің даму барысында төртінші буыны ERA-Interim және бесінші буыны ERA5 ең соңғы түрлері болып келеді. Қазіргі кезде ERA-Interim реанализ моделі ескіріп, дамуын тоқтатты. Оның орнына ERA5 реанализ моделі келді (Hersbach, Bell, Berrisford, et al., 2020: 3).

ERA5 тропопаузасының ай сайынғы стандартты ауытқулары ERA-Interim-ге қарағанда 60%-ға көп, ал тропопаузаның ай сайынғы стандартты ауытқулары 30%-ға көп екені анықталды. ERA5 реанализінің тропопаузасының биіктігі мен температурасы бойынша мұндай нәтижелері шынайы болып келеді. Осы зерттеуде ERA5 ERA-Interim-ге қарағанда бірінші және екінші тропопаузаның биіктігін екі негізгі деректер жиынтығына қатысты бағалау кезінде жақсы көрсеткіштерді көрсетеді (Hoffmann, Spang, 2021: 33).

ERA5 реанализінің мәліметінде негізделген жұмыстарда реанализ ақпараты мен зондылау ақпаратының арасында жақсы байланыс көрінді, әсіресе корреляция коэффициенті күзгі мерзімде максималды мәндеріне ие болды (Ариунсолонго, Жамбажамц, Монхцэцэг, 2021: 4).

Бұл жұмыста ауа температурасының, жел жылдамдығы және салыстырмалы ылғалдылықтың орташа айлық мәндердің бағалау үшін үш көрсеткіш есептеледі: нормаланған ауытқулар (NBIAS), нормаланған орташа абсолютті қате (NMAE) және нормаланған орташа квадраттық қате (NRMSE). Бұл көрсеткіштер төмен корреляциялық байланыстың қателерін және жоғары ауытқуды бір статистикаға тиімді біріктіретін индикатор болып келеді. Оларды келесі формулалар арқылы есептеледі:

$$NBIAS = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{\bar{X}_{pa}(t) - \bar{X}_{pz}(t)}{\bar{Y}_{pz}}, \quad (1)$$

$$NMAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{\bar{X}_{pa}(t) - \bar{X}_{pz}(t)}{\bar{Y}_{pz}} \right|, \quad (2)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left( \frac{\bar{X}_{pa}(t) - \bar{X}_{pz}(t)}{\bar{Y}_{pz}} \right)^2} \quad (3)$$

мұндағы,  $\bar{X}_{pa}$  – реанализ мәліметі бойынша метеорологиялық параметрлердің әр айының орташа мәні;

$\bar{X}_{pz}$  – радиозондылау арқылы алынған метеорологиялық параметрлердің әр айының орташа мәні;

$\bar{Y}_{pz}$  – радиозондылаудан алынған метеорологиялық параметрлердің орташа жылдық мәні.

Реанализ архивы негізінде алынған жел параметрының көрсеткіштерін SI жүйесіне келтіру үшін келесі тендеу қолданылды:

$$W_{ж} = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

мұндағы,  $U$  – желдің зоналды көрсеткіші;

$V$  – желдің меридионалды көрсеткіші;

$W_{ж}$  – жел жылдамдығы болып табылады (Tetzner, Thomas, Allen, 2019: 5).

Сонымен қатар, реанализ бен радиозонд ақпараттарының арасындағы байланысты тексеру үшін Пирсонның (R) сызықтық корреляциясы статистикалық есептеулер қосылды. Корреляция немесе корреляциялық байланыс – екі немесе одан да көп кездейсоқ шамалардың статистикалық байланысы (немесе белгілі бір рұқсат етілген дәлдік деңгейімен осындай деп санауға болатын шамалар) (Саадалов, Мырзаibraимов, Абдуллаева, 2021: 2).

### Нәтижелері мен талдау

Қазіргі таңда жер бетінде аэрологиялық станцияларымен қамтамасыз етілуі нашар болғандықтан, сондай-ақ, бар станциялардағы ақпараттың толық болмауынан көптеген ғалымдар еркін атмосфераны зерттеулерінде түрлі реанализ модельдердің мәліметтерін қолдануда.

Климаттың өзгерісін зерттеген жұмыста Солтүстік жарты шардағы жер беті температурасының 1850-2014 жылдар аралығында ауа температурасының өсу және төмендеу мерзімдері анықталды. Соңғы он жылдық бүкіл сенімді метеорологиялық ақпарат жиналған жылдар ішінде ең жылы болып анықталды. Ауа температурасының орташа жылдық мәнінің

аномалиясының максимумына 2005 ж. (0,719 °C), 2010 ж. (0,713 °C) және 2014 ж. (0,750 °C) жетті. Казань станциясының 1828-2014 жылдар мәліметтерінің анализі ауа температурасының жылдық орташа мәні 4°C артқан және бұл өзгерістердің жартысы жаһандық факторлармен түсіндіріледі (Переведенцев, Шанталинский, 2015: 12).

Зерттеудің мақсаты болып негізгі метеорологиялық көрсеткіштердің биіктік бойынша таралуын және реанализ бен радиозонд мәліметтерінің сенімділігін қарастыру.

Температура – ортаның немесе бөлек дененің жылулық сипаттамасы, барлық түрдегі термометр арқылы бақыланады және белгілі бір температуралық шкала арқылы өлшенеді. Температура Халықаралық тәжірибелік шкала бойынша Цельсий градусымен есептеледі. (Тихонов, 2011: 19).

Алматы қаласындағы осы уақыт аралығындағы ауа температурасының статистикалық есептеулері келесі кестеде берілген (1-кесте).

**1-кесте** – Тропосферадағы ауа температурасы үшін алынған радиозондылау және ERA5 реанализ мәліметтеріне статистикалық талдау

Изобаралық беттік, гПа	00 уақыт				(P3-ERA5)	12 уақыт				(P3-ERA5)
	Радиозонд		ERA5			Радиозонд		ERA5		
	T <sub>орт</sub>	σ	T <sub>орт</sub>	σ		T <sub>орт</sub>	σ	T <sub>орт</sub>	σ	
925	6,8	10,2	10	10,9	<b>-3,2</b>	14,5	13,8	13,9	12,8	<b>0,6</b>
850	8,7	10,2	8,7	9,8	<b>0</b>	10,1	11	9,7	10,5	<b>0,4</b>
700	-0,7	7,9	-1,3	7,7	<b>0,6</b>	-0,4	8,2	-1	7,9	<b>0,5</b>
500	-18,8	7	-18,9	7	<b>0,1</b>	-18,5	7,1	-18,4	7,1	<b>0,1</b>
400	-30,5	7	-30,9	7	<b>4</b>	-30,2	7,3	-30,6	7,1	<b>0,4</b>
300	-45,4	6,9	-45,9	6,7	<b>0,5</b>	-45	7	-45,7	6,9	<b>0,7</b>
200	-56,1	6,9	-56,1	6,6	<b>0</b>	-56	6,9	-56,4	6,5	<b>0,4</b>
100	-60	3,2	-60,2	2,8	<b>0,2</b>	-60	2,9	-57,7	2,7	<b>-2,3</b>

1-кестеде көрсетілгендей, ауа температурасының нақты шамасы биіктік бойынша азаяды, жер бетінде шамамен 7-9 °C-тан тропопауза деңгейіне жақындағанда -60 °C-қа тең болды.

Нақты радиозондылау арқылы алынған ақпаратты болжанған ақпаратпен салыстыратын болсақ, екіншісінің таралуы эмпирикалық мәнінің таралуына ұқсас екенін көруге болады. Әсіресе, 850-200 гПа деңгелерінің аралығында берілген шамалардың арасындағы айырмашылық ±0,6 °C-тан аспайды. Бірақ, жер бетіне жақын деңгейде және 100 гПа деңгейіне жақын аумақта айырмашылығы өсетінін көруге болады.

Радиозонд пен реанализ мәліметтері арасындағы ауытқулары таңертенгі сағаттарда (ОГУ 00) 0,0 °C -тан -3,2 °C аралығында өзгереді, ең үлкен айырмашылығы жер бетіне жақын деңгейінде, яғни 925 гПа-да -3,2 °C құраған. Күндізгі уақытта (ОГУ 12) -2,3 °C пен 0,7 °C аралығында өзгереді. Яғни ең үлкен айырмашылығы 100 гПа деңгейінде -2,3°C-қа дейін жетеді.

Орташа квадраттық ауытқуы радиозонд және ERA5 климаттық базасы бойынша 2,7-13,8 аралығында өзгереді және жерге жақын деңгейлерінде орташа квадраттық ауытқу үлкен мәндеріне тең болады, ал биіктеген сайын мәні азаяды.

Ауа температурасының реанализ моделімен алынған шамаларының жер бетіне жақын қабатта және 100 гПа деңгейінде салыстырмалы түрде қатты ауытқуы жер бетінің орографиялық біртексіздігінен және 100 гПа деңгейіне жақын аумақта өтпелі қабат тропопаузаның орналасуымен түсіндіруге болады. Яғни, әлі де реанализ моделі ауа температурасына әсер ететін барлық факторларды ескере алмайды.

Салыстырмалы ылғалдылық (f) деп су буының парциальді (нақты) қысымының сол температурадағы қанығу қысымына қатынасын айтады (Матвеев, 1984: 50). Келесі қарастырылған метеорологиялық шама болып салыстырмалы ылғалдылық (2-кесте) алынды.

**2-кесте** – Тропосферадағы салыстырмалы ылғалдылық үшін алынған радиозондылау және ERA5 реанализ мәліметтеріне статистикалық талдау

Изобаралық беттік, гПа	00 уақыт				(P3-ERA5)	12 уақыт				(P3-ERA5)
	Радиозонд		ERA5			Радиозонд		ERA5		
	f	σ	f	σ		f	σ	f	σ	
925	81	14	57	20	24	54	24	46	23	8
850	55	23	49	22	6	49	23	45	23	4
700	53	25	53	26	0	51	24	51	25	0
500	54	28	52	31	2	50	26	56	31	-6
400	49	25	54	32	-5	46	24	56	31	-10
300	47	22	61	32	-14	43	20	63	31	-20
200	41	20	30	28	11	36	18	33	29	3
100	33	17	5	2	27	29	16	5	2	24

2 кестеде, Алматы қаласының үстінде салыстырмалы ылғалдылықтың эмпирикалық көрсеткіштер мен реанализ көрсеткіштерінің көпжылдық орташа таралуы берілген. Радиозондылау ақпаратымен реанализ моделі арқылы алынған ақпаратты салыстыратын болсақ, таңертенгі уақытта ауытқушылығы -5%-тен 24% жетеді, яғни көп жағдайда радиозонд мәліметтері салыстырмалы түрде үлкенірек мәндерді көрсетеді. Күндізгі уақытта ауытқу мәндері төменірек, бірақ сонымен қатар, радиозондылау мәліметтердің ERA5 базасымен салыстырғанда төмендетілген де, көбейтілген де көрсеткіштерге ие болады. Сонымен қатар, көрсеткіштердің таралуында қандай да бір заңдылықтар айқындалмайды.

Радиозондылау арқылы алынған ақпараттан реанализдің нәтижесінде алынған мәліметтің айырмашылығы жер бетіне жақын қабатта және 300-100гПа деңгейлерінде қатты байқалады, және өзгешеліктің мәні  $\pm 10-30\%$ . Ал осы қабаттардың арасында нақты ақпараттан өзгешелік  $\pm 5\%$ -ды құрайды. Жалпы алғанда, жер бетінен шамамен 300-200 гПа дейін реанализ массивінің нәтижесі

радиозондтық барлауды жақсы қайталайды.

Салыстырмалы ылғалдылықты реанализ моделі нақты ақпаратпен салыстырғанда жер бетінен 700 гПа дейін азайтып көрсетеді, ал 500-300 гПа аралығында сәл өсіріп көрсетеді. Жалпы алғанда, салыстырмалы ылғалдылық болжауға қиын метеорологиялық шама болып келеді, өйткені ол көптеген факторларға бағынышты. Сондықтан да реанализ бен радиозонд мәліметтерінің арасындағы мұндай айырмашылық бақыланады.

Метеорологиялық шаманың маңызды көрсеткіштерінің бірі жел жылдамдығы болып табылады. Жел жылдамдығы векторлық шама болып келеді, ол ауа бөлшегінің бір жерден екінші жерге орын ауыстыру қабілеттілігін көрсетеді. Жел жылдамдығы биіктік бойынша өседі және жер бетінен жоғарылаған сайын изобаралармен параллель жылжи бастайды (Байшоланов, 2000: 50).

Келесі кестеде жел жылдамдығының Алматы АС-да алынған барлау ақпараты мен реанализ мәліметі үшін статистикалық ақпарат берілген(3-кесте).

**3-кесте** – Тропосферадағы жел жылдамдығы үшін алынған радиозондылау және ERA5 реанализ мәліметтеріне статистикалық талдау

Изобаралық беттік, гПа	00 уақыт				(P3-ERA5)	12 уақыт				(P3-ERA5)
	Радио-д		ERA5			Радио-д		ERA5		
	V	σ	V	σ		V	σ	V	σ	
925	2,8	1,7	3,50	2	-0,7	2	1,06	4	2	-2

Кестенің жалғасы

850	4,5	2,5	4	2,6	0,5	4,6	2,8	3,9	2,4	0,7
700	6,4	3,8	5,9	3,8	0,5	3	1,9	6	3,8	1
500	13,6	7,1	13,6	7	0	13,6	7	17,7	8,7	-4,1
400	17,3	8,9	17,5	8,7	-0,2	17,4	8,8	17,7	8,7	-0,3
300	22	11	22,5	10,9	-0,5	22,6	11,1	22,9	11	-0,3
200	26	12,5	26,3	11,2	-0,3	26,2	11,3	26,7	11,3	-0,5
100	20,7	7,34	20,9	7,35	-0,2	21,8	7,9	21	7,2	0,8

3 кестеде, 00 уақыт үшін реанализ архивінің деректері радиозондылау деректерінен кішкентай ауытқуларға ие, шамамен 0-0,5 м/с. Бұл ERA5 реанализінің Алматы қаласы үшін жел жылдамдығын тропосферада жақсы анықтайтындығын көрсетеді.

Орташа квадраттық ауытқу секілді статистикалық мәлімет үшін де таралу тенденциясы екі ақпарат көздерінде ұқсас, және реанализ массивінің мәліметтерінің біркелкілігін байқауға болады.

00 уақытқа қарағанда 12 уақытта реанализ бен радиозонд ақпараттары сәйкестігі азырақ болып келеді, айырмашылығы шамамен 0,5-1 м/с-ке

дейін өсті. Ал жер бетіне жақын қабатта реанализ массивінде болжанған жел жылдамдығы нақты шамадан 2 м/с-ке көп екенін, яғни метеошаманы екі есе асырып көрсетіп отыр. 500 гПа деңгейінде де ауытқушылық үлкен, және реанализ массиві жел жылдамдығын 4,1 м/с-ке өсіріп болжады. Мұндай ауытқушылық, орографиялық факторға байланысты және 500 гПа биіктігінде жылғалы ағысының өтуінен болады. Сонымен, ERA5 реанализ массиві жел жылдамдығын жақсы көрсетеді деп айтуға болады.

Зерттеудің мақсатына сәйкес екі ақпарат көздерінің метео шамаларының корреляциялық байланысы қарастырылды (4-кесте).

**4-кесте** – Тропосферадағы метеорологиялық элементтердің нақты және ERA5 реанализ арқылы алынған шамалары арасындағы корреляциялық коэффициент

Изобаралық беттік, гПа	T		f		V	
	00 сағ	12 сағ	0 сағ	12 сағ	0 сағ	12 сағ
925	0,95	0,98	0,51	0,80	0,45	0,38
850	0,99	0,98	0,79	0,81	0,56	0,53
700	0,99	0,99	0,87	0,85	0,71	0,71
500	0,99	0,99	0,83	0,6	0,92	0,85
400	0,99	0,98	0,80	0,77	0,94	0,95
300	0,98	0,98	0,63	0,61	0,95	0,95
200	0,98	0,98	0,25	0,25	0,86	0,98
100	0,83	0,89	-0,10	-0,04	0,95	0,84

Кестеде көрсетілгендей, ауа температурасы үшін екі бақылау уақытында да реанализ бен радиозондылау арқылы алынған ақпараттары арасындағы корреляциялық байланыс өте жақсы. Жер бетінен шамамен 12 км биіктіке дейін корреляция коэффициенті 0,95-0,99 арасында өзгереді, тек 100 гПа деңгейінде корреляция коэффициенті 0,83 және 0,89 тең. Бірақ, бұл көрсеткіштер

де өте жақсы байланыстын бар екендігін мәлімдейді. Яғни, бұл метеорологиялық элементтің тропосферадағы таралуын бақылауда ERA5 реанализ архивін қолдануға болады.

Ал, салыстырмалы ылғалдылық бойынша реанализ мәліметтерінің нақты ақпаратпен корреляциялық байланысы ауа температурасымен салыстырғанда нашарлау болып келеді.

925-300 гПа деңгейлері арасында корреляция коэффициенті 0,6-0,8-ге тең және байланысты жақсы деп санауға болады. Бұл қабаттардан биіктеген сайын байланыс тұрақтылығы үзіліп, екі мәлімет көзі арасындағы корреляциялық коэффициент  $\pm 0,25$  аралығында болды. Ауа температурасына қарағанда салыстырмалы ылғалдылын болжау қиын болып келеді, сондықтан да ERA5 реанализ массивін тек шамамен 9 км биіктігіне дейін ғана қолдануға ұсынылады.

Жел жылдамдығы үшін корреляциялық байланыс жер бетінен 1.5-3 км биіктігіне дейін қанағаттандырарлық, биіктеген сайын екі ақпарат көздерінің арасындағы байланыс тығыздығы өседі. Яғни реанализ мәліметтерінің сенімділігі де артады.

Екі ақпарат көздерінің арасындағы байланысты толығымен қарастыру үшін қосымша тиімділік (эффektivтілік) көрсеткіштері есептелінді, олар келесі кестеде берілген (5-кесте).

**5-кесте** – Тропосферадағы 00 уақыттағы радиозондтық бақылаулар мен ERA5 реанализ массивінен алынған метеорологиялық элементтердің тиімділік көрсеткіштері

00 срок	Ауа температурасы			Салыстырмалы ылғалдылық			Жел жылдамдығы		
	NBIAS, %	NMAE, %	NRMSE, %	NBIAS, %	NMAE, %	NRMSE, %	NBIAS, %	NMAE, %	NRMSE, %
925	0,05	0,05	0,18	-0,02	0,02	0,09	0,02	0,02	0,08
850	0,00	0,00	0,02	-0,01	0,01	0,05	-0,01	0,01	0,05
700	0,05	0,05	0,24	0,00	0,00	0,02	-0,01	0,01	0,04
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,01
400	0,01	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
300	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,11	0,00	0,00	0,01
200	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,03	0,12	0,00	0,00	0,02
100	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,07	0,26	0,00	0,00	0,01

5-кестеде берілгендей, таңғы уақыттардағы ауа температурасы, салыстырмалы ылғалдылық және жел жылдамдығының реанализ бен радиозондылау ақпараттары үшін нормаланған ауытқулар (NBIAS), нормаланған орташа абсолютті қате (NMAE) және нормаланған орташа квадраттық қате (NRMSE) есептелінді.

Ауа температурасы үшін нормаланған ауытқу (НА) мен нормаланған орташа абсолютті қате (НОАҚ) биіктік бойынша 0,00-0,05 аралығында өзгерді. Ал нормаланған орташа квадраттық қате (НОКҚ) де 0,00-0,05 аралығында өзгерді, тек 925 гПа мен 700 гПа деңгейлерінде сәйкесінше 0,18 бен 0,24-ке тең болды. Яғни, ауа температурасы үшін жер бетінен жоғарылаған сайын реанализ ақпараттарының радиозонд мәліметінен ауытқуы азаяды.

Салыстырмалы ылғалдылық үшін бұл көрсеткіштер келесідей болып келеді, НА мен НОАҚ көрсеткіштері 0,00-0,07 аралығында өз-

герген, ал НОКҚ 0,00-0,26 аралығында болды. Жер бетіне жақын қабатта қателіктердің көрсеткіштері шамамен 0,02-0,09 аралығында болды. Одан жоғарылаған сайын 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа және 400 гПа деңгейлерінде реанализ бен радиозондылау ақпараты арасында байланыс жақсарып, қателіктер -0,01 және 0,05 аралығындағы ауытқыды. Одан жоғары екі ақпарат көздері арасындағы байланыс нашарлағаны көрінеді, әсіресе НОКҚ көрсеткіші өсіп, 0,11-0,26 аралығындағы мәндерге ие болады. Бұл салыстырмалы ылғалдылық үшін биіктеген сайын реанализ бен радиозондылау ақпараттарының арасындағы байланыстың азаятынын көрсетеді.

Жел жылдамдығы үшін үш көрсеткіштің мәндері 0,00-0,08 аралығында ауытқыды.

Осы көрсеткіштердің кешкі барлау уақытындағы (12 срок) байланысты анықтау үшін тиімділік (эффektivтілік) көрсеткіштері есептелінді, олар келесі кестеде берілген (6-кесте).

**6-кесте** – Тропосферадағы 12 уақыттағы радиозондтық бақылаулар мен ERA5 реанализ массивінен алынған метеорологиялық элементтердің тиімділік көрсеткіштері

12 срок	Ауа температурасы			Салыстырмалы ылғалдылық			Жел жылдамдығы		
	NBIAS, %	NMAE,%	NRMSE,%	NBIAS,%	NMAE,%	NRMSE,%	NBIAS,%	NMAE,%	NRMSE,%
925	0,00	0,01	0,03	-0,01	0,01	0,06	0,02	0,02	0,09
850	0,00	0,00	0,02	-0,01	0,01	0,04	-0,01	0,01	0,06
700	0,09	0,10	0,57	0,00	0,00	0,02	-0,01	0,01	0,04
500	0,05	0,05	0,18	0,01	0,01	0,05	0,03	0,03	0,09
400	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,07	0,00	0,00	0,01
300	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,14	0,00	0,00	0,01
200	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,03	0,12	0,00	0,00	0,01
100	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,07	0,26	0,00	0,00	0,01

6-кестеде, кешкі уақыттардағы ауа температурасы, салыстырмалы ылғалдылық және жел жылдамдығының реанализ бен радиозондылау ақпараттары үшін жоғарыда айтылып кеткен үш көрсеткіш есептелінді.

Ауа температурасы үшін нормаланған ауытқу (НА) мен нормаланған орташа абсолютті қате (НОАҚ) биіктік бойынша 0,00-0,05 аралығында өзгерді, тек 700 гПа деңгейінде қателіктер сәйкесінше 0,09 бен 0,10 болды. Ал нормаланған орташа квадраттық қате (НОКҚ) 0,00-0,03 аралығында өзгерді, тек 925 гПа мен 700 гПа деңгейлерінде сәйкесінше 0,57 мен 0,18-ге тең болды.

Салыстырмалы ылғалдылық үшін бұл көрсеткіштер келесідей болып келеді, НА мен НОАҚ көрсеткіштері  $\pm 0,00-0,07$  аралығында өзгерген, ал НОКҚ 0,00-0,26 аралығында болды. Жер бетінен 400 гПа деңгейіне дейін нормаланған орташа квадраттық қателігі шамамен 0,02-0,07 аралығын болды. Одан жоғары екі ақпарат көздері арасындағы байланыс нашарлайды және НОКҚ көрсеткіші өсіп, 0,12-0,26 аралығында болады. Бұл салыстырмалы ылғалдылық үшін биіктеген сайын реанализ бен радиозондылау ақпараттарының арасындағы байланыстың азаятынын көрсетеді.

Жел жылдамдығы үшін нормаланған ауытқу (НА) мен нормаланған орташа абсолютті қате (НОАҚ) биіктік бойынша 0,00-0,03 аралығында

өзгерді. Ал нормаланған орташа квадраттық қате (НОКҚ) 925-500 гПа аралығында 0,00-0,09 арасында ауытқыса, бұл қабаттан жоғары қателік 0,01 тең болады.

### Қорытынды

Метеорологиялық элементтердің вертикальді таралуын салыстыру мен бағалау нәтижесінде келесідей қорытындылар алынды:

Ауа температурасының мәні биіктік бойынша азаяды, оның мәні 11,4 °С-тан -60 °С аралығында өзгереді. Салыстырмалы ылғалдылығы да жер бетінен биіктеген сайын азаяды, оның мәні 63 %-дан 5 %-ға аралығында өзгереді. Ал жел жылдамдығы профилінде мәнінің өсу тенденциясы байқалады, шамасы 0,9-23,4 м/с аралығында өзгереді.

Ауа температурасы үшін радиозондтық барлау мен реанализ моделі ақпараттары ұқсас, айырмашылығы  $\pm 3,2$  °С аспайды. Екі ақпараттар көздерінің арасындағы корреляциялық байланысы өте тығыз (0,98) болып келеді. Ауа температурасы үшін нормаланған ауытқу (НА) мен нормаланған орташа абсолютті қате (НОАҚ) биіктік бойынша 0,00-0,05 аралығында өзгерді. Нормаланған орташа квадраттық қате (НОКҚ) де 0,00-0,05 аралығында өзгерді, тек 925 гПа мен 700 гПа деңгейлерінде сәйкесінше 0,18 бен 0,57 аралығын көрсетті.

Салыстырмалы ылғалдылығының көпжылдық орташа мәндерінің айырмашылығы жалпы тропосферада  $\pm 30\%$  тең болды, көбінесе  $\pm 5-10\%$ -ға тең. Радиозондылау ақпараты мен реанализ массивінің мәліметі арасындағы корреляциялық коэффициент жер бетінен 300 гПа деңгейі арасында мәні шамамен 0,6-0,8 ауытқиды, яғни қанағаттандырарлық болып саналады. Одан жоғары корреляциялық байланыс нашарлайды. Салыстырмалы ылғалдылық үшін НА мен НОАҚ көрсеткіштері 0,00-0,07 аралығында өзгерген, ал НОКҚ 0,00-0,26 аралығында болды. Жер бетінен 400 гПа деңгейіне дейін нормаланған орташа квадраттық қателігі шамамен 0,02-0,07 аралығын болды. Одан жоғары екі ақпарат көздері арасындағы байланыс нашарлайды және НОКҚ көрсеткіші өсіп, 0,12-0,26 аралығында болады. Бұл салыстырмалы ылғалдылық үшін биіктеген сайын реанализ бен радиозондылау ақпараттарының арасындағы байланыстың азаятынын көрсетеді.

Жел жылдамдығы метеорологиялық параметры бойынша ERA5 реанализ деректері барлау ақпаратынан көп жағдайда  $\pm 0,3-0,5$  м/с аралығында ғана ауытқиды. Екі архивтердің арасындағы корреляциялық байланысы жер бетінен биіктеген сайын жақсарады және 500 гПа биіктіктен бастап 0,84-0,98 аралығында ауытқиды. Жел жылдамдығы үшін нормаланған ауытқу (НА) мен нормаланған орташа абсолютті қате (НОАҚ) биіктік бойынша 0,00-0,09 аралығында өзгерді.

Сонымен, ERA5 реанализ моделі арқылы алынған тропосферадағы метеорологиялық элементтерінің көрсеткіштері радиозондылау арқылы алынған нақты мәндеріне өте жақын болып келеді. Бұл метеорологиялық элементтерінің, әсіресе ауа температурасының, өзгерісінің көпжылдық климаттық тенденциясын зерттеуге реанализ ақпаратын қолдануға мүмкіндік береді.

#### Әдебиеттер

- Ариунсолонго Г., Жамбажамц Л., Монхцэцэг З. Сравнение данных реанализов ERA5 с инструментальными наблюдениями метеорологических величин на территории Монголии // Материалы Международной конференции «Климатические риски и космическая погода». – 2021. – 321-325.
- Байшоланов С.С. Меторология және климатология. – Алматы: Қазақ университеті, – 2000. – 129 б.
- Galabov, V. (2020). The Western Black Sea Waves 1980-2020- Study Based on ERA5. *Proceeding of 1st International Conference on Environmental Protection and Disaster RISKS, 2020*, p. 302-310. <https://doi.org/10.48365/ENVR-2020.1.27>
- Eresanya, E.O.; Guan, Y. Variance of the Equatorial Atmospheric Circulations in the Reanalysis. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1386. <https://doi.org/10.3390/jmse9121386>
- Лубков А.С., Сухоно О.Ю. Исследование ветроэнергетических ресурсов крымского полуострова по ежечасным данным реанализа era5 // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 3 (41). С. 23–29.
- Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии/ Физика атмосферы. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1984.
- Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М. Изменение приземной температуры воздуха Северного полушария за период 1850 – 2014 гг. // Учен. зап. Казан. Ун-та. Сер.Естеств. науки. – 2015. – Т. 157, кн. 3. – С. 8 – 19.
- Полонский А.Б., Бейцер С.С. Идентификация изменений температуры воздуха в Атлантико-Европейском и Средиземноморском регионах по данным ре-анализа ERA5 // Системы контроля окружающей среды. – 2021. Вып. 1 (43). – С. 18–24.
- Саадалов Т. Ы., Мырзаibraимов Р. М., Абдуллаева Ж. Д. Методика расчета коэффициента корреляции Фехнера и Пирсона, и их области применения // Бюллетень науки и практики. – 2021. Т. 7. №10. – С. 270-276. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/71/31>
- Tetzner D., Thomas E., Allen C. A Validation of ERA5 Reanalysis Data in the Southern Antarctic Peninsula–Ellsworth Land Region, and Its Implications for Ice Core Studies // *Geosciences* 2019, 9, 289; doi:10.3390/geosciences9070289
- Тихонов Н.Н., Орлов А.Н., Павликова Е.В. Метеорология и климатология: методические указания к лабораторно-практическим занятиям / сост.: – Пенза: РИО ПГСХА, 2011. – 91 с.
- Thompson, D.M.; Cole, J.E.; Shen, G.T.; Tudhope, A.W.; Meehl, G.A. Early twentieth-century warming linked to tropical Pacific wind strength. *Nat. Geosci.* 2015, 8, 117–121.
- Thomas S. R., Nicolau S., Martinez-Alvarado O., Drew D. J., Bloomfield H.C. How Well Do Atmospheric Reanalyses Reproduce 2 Observed Winds in Coastal Regions of Mexico? July 28, 2021
- Uppala S., Dee D., Kobayashi S., Simmons A. Evolution of reanalysis at ECMWF // *ResearchGate*, 2008, 1.
- Fu G., Charles S.P., Timbal B., Jvanovicc B., Ouyangd F. Comparison of NCEP-NCAR and ERA-Interim over Australia // *International Journal of Climatology* . September 2015
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *QJR Meteorol Soc.* 2020;146:1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hoffmann, L. and Spang, R.: An assessment of tropopause characteristics of the ERA5 and ERA-Interim meteorological reanalyses, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/acp-2021-961>, in review, 2021.

Шимарин А.В., Переведенцев Ю.П., Сабирова М.В. Особенности вертикального распределения температуры воздуха в тропосфере и нижней стратосфере // Вестник Удмуртского университета. Серия биология. Науки о земле. – 2019. Т. 29, вып. 2. – 258-266.

Weather Data for Wyoming <http://weather.uwyo.edu>

Datasets <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

Copernicus services catalogue <https://www.copernicus.eu>

## References

Ariunsolongo G., Zhambazhame L., Monhcejeg Z. Sravnenie dannyh reanalizov ERA5 s instrumental'nymi nabljudenijami meteorologicheskikh velechin na territorii Mongolii // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «Klimaticheskie riski i kosmicheskaja pogoda», 2021, 321-325.

Bajsholanov S.S. Meteorologija zhəne klimatologija.–Almaty.:Қазақ университеті. -2000. – 129 b.

Galabov, V. (2020). The Western Black Sea Waves 1980-2020- Study Based on ERA5. Proceeding of 1st International Conference on Environmental Protection and Disaster RISKS, 2020, p. 302-310. <https://doi.org/10.48365/ENVR-2020.1.27>

Eresanya, E.O.; Guan, Y. Variance of the Equatorial Atmospheric Circulations in the Reanalysis. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1386. <https://doi.org/10.3390/jmse9121386>

Lubkov A.S., Suhono O.Ju. ISSLEDOVANIE VETROJEENERGETICHESKIH RESURSOV KRYMSKOGO POLUOSTROVA PO EZHECHASNYM DANNYM REANALIZA ERA5 // Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy. 2020. Vyp. 3 (41). С. 23–29.

Matveev L.T. Kurs obshhej meteorologii/ Fizika atmosfery. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984

Perevedencev Ju.P., Shantalinskij K.M. Izmenenie prizemnoj temperatury vozduha Severnogo polusharija za period 1850 – 2014 gg. // Uchen. zap. Kazan. Un-ta. Ser.Estestv. nauki. – 2015. – Т. 157, kn. 3. – С. 8 – 19.

Polonskij A.B., Bejcer C.C. Identifikacija izmenenij temperatury vozduha v Atlantiko-Evropejskom i Sredizemnomorskom regionah po dannyh re-analiza ERA5 // Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy. 2021. Vyp. 1 (43). С. 18–24.

Saadalov T. Y., Myrzaibraimov R. M., Abdullaeva Zh. D. Metodika rascheta koeficienta korrelyacii Fehnera i Pirsona, i ih oblasti primenenija // Bjulleten' nauki i praktiki. 2021. Т. 7. №10. S. 270-276. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/71/31>

Tetzner D., Thomas E., Allen C. A Validation of ERA5 Reanalysis Data in the Southern Antarctic Peninsula—Ellsworth Land Region, and Its Implications for Ice Core Studies // *Geosciences* 2019, 9, 289; doi:10.3390/geosciences9070289

Tihonov N.N., Orlov A.N., Pavlikova E.V. Meteorologija i klimatologija: metodicheskie ukazanija k laboratorno-prakticheskim zanjatijam / sost.;; – Penza: RIO PGSHA, 2011. – 91 s.

Thompson, D.M.; Cole, J.E.; Shen, G.T.; Tudhope, A.W.; Meehl, G.A. Early twentieth-century warming linked to tropical Pacific wind strength. *Nat. Geosci.* 2015, 8, 117–121.

Thomas S. R., Nicolau S., Martinez-Alvarado O., Drew D. J., Bloomfield H.C. How Well Do Atmospheric Reanalyses Reproduce 2 Observed Winds in Coastal Regions of Mexico? July 28, 2021

Uppala S., Dee D., Kobayashi S., Simmons A. Evolution of reanalysis at ECMWF // *ResearchGate*, 2008, 1.

Fu G., Charles S.P., Timbal B., Jvanovic B., Ouyang F. Comparison of NCEP-NCAR and ERA-Interim over Australia // *International Journal of Climatology* . September 2015

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *QJR Meteorol Soc.* 2020;146:1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hoffmann, L. and Spang, R.: An assessment of tropopause characteristics of the ERA5 and ERA-Interim meteorological reanalyses, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/acp-2021-961>, in review, 2021.

Шимарин А.В., Переведенцев Ю.П., Сабирова М.В. Особенности вертикального распределения температуры воздуха в тропосфере и нижней стратосфере // ВЕСТНИК УДМУРТСКОГО УНИВЕРСИТЕТА СЕРИЯ БИОЛОГИЯ. НАУКИ О ЗЕМЛЕ 2019. Т. 29, вып. 2. – 258-266.

Weather Data for Wyoming <http://weather.uwyo.edu>

Datasets <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

Copernicus services catalogue <https://www.copernicus.eu>