



ISSN 0201 — 9957

Федеральная служба по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды



ТРУДЫ

**ВСЕРОССИЙСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ —
МИРОВОГО ЦЕНТРА ДАННЫХ**

ВЫПУСК
191

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Т Р У Д Ы
ВСЕРОССИЙСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ –
МИРОВОГО ЦЕНТРА ДАННЫХ



*Под редакцией
доктора физико-математических наук А. М. Стерина*

ОБНИНСК
2023

Адрес: 249031, Обнинск, ул. Королёва, 6
Телефон: (484) 396-40-85
Факс: (484) 396-86-11
E-mail: [wdcb@meteo.ru](mailto:wdcб@meteo.ru)
Web site: <http://www.meteo.ru>

Редакционная коллегия

Главный редактор д.ф.-м.н. В. М. Шаймарданов

Зам. главного редактора д.ф.-м.н. А. М. Стерин

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. И. В. Черных

*Члены редколлегии: к.т.н. С. В. Белов, д.т.н. Е. Д. Вязилов,
к.г.н. Е. Д. Гниломедов, к.г.н. Н. Н. Коршунова, к.ф.-м.н. С. Г. Сивачок,
д.г.н. М. З. Шаймарданов, д.г.н. Б. Г. Шерстюков, к.ф.-м.н. А. В. Хохлова*

В сборнике содержится ряд статей, подготовленных главным образом сотрудниками ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», по тематикам, связанным с климатической системой и её изменениями.

Рассматриваются изменения как приземного климата, так и климата свободной атмосферы, климата гидросферы, в частности тенденции изменений режимов важных климатообразующих характеристик Чёрного моря. Исследования режимов разных компонент климатической системы проводятся с использованием специализированных массивов климатических данных, формируемых ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» и предоставляемых потребителям климатической продукции.

Обсуждаются также вопросы улучшения качества климатических массивов, обеспечения однородности климатических рядов.

Сборник будет полезен широкому кругу специалистов, заинтересованных в использовании информации об окружающей природной среде, её изменениях, в первую очередь информации о структуре климатической системы и об изменениях в климатической системе.

The collection contains a number of articles provided mainly by researchers from «RIHIMI-WDC» on the topics related to the climate system and its changes.

Changes in surface climate, free atmosphere climate, and hydrosphere climate are considered with the particular emphasis on trends in changes in the important climate-forming characteristics of the Black Sea. The study of changes in different components of the climate system is conducted on the basis of specialized climate data sets generated by RIHIMI-WDC and provided to users of climatic products.

The issues of improving the quality of climate data sets and ensuring homogeneity of climate data series are also discussed.

The collection will be useful to a wide range of specialists interested in the use of information on the environment and its changes, and particularly information on the structure of the climate system and its changes.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Черных И.В., Алдухов О.А.</i> Долгопериодные оценки границ и толщины восстановленных по радиозондовым профилям облачных слоёв для российских станций.....	5
<i>Финаев А.Ф., Разуваев В.Н.</i> Гомогенизация данных среднемесячных осадков по метеорологическим станциям России.....	19
<i>Финаев А.Ф., Разуваев В.Н.</i> Гомогенизация данных суточных осадков по метеорологическим станциям России	34
<i>Клещенко Л.К.</i> Климатический режим солнечного сияния на территории России.....	45
<i>Кузнецова В.Н., Швець Н.В.</i> Характеристика климатических изменений относительной влажности воздуха на азиатской территории России за период 1966–2021 гг.	56
<i>Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б.</i> Вычисление прогностических оценок изменений месячных значений температуры воздуха и атмосферных осадков в России на два десятилетия	68
<i>Вязилова Н.А.</i> Мониторинг циклонической активности в Северной Атлантике на основе показателей ЕСИМО.....	88
<i>Вязилова Н.А., Вязилов А.Е.</i> Циклоническая активность в Северной Атлантике по данным реанализа ERA5 и колебания атмосферной циркуляции	99
<i>Воронцов А.А., Баталкина С.А., Булыгин А.М., Нефёдова Г.И.</i> Солёностный режим Чёрного моря в последние пять лет	111
<i>Воронцов А.А., Баталкина С.А., Нефёдова Г.И.</i> Изменения термического режима деятельного слоя Чёрного моря.....	121
<i>Воронцов А.А., Нефёдова Г.И., Баталкина С.А.</i> Тенденции изменения плотности морской воды Чёрного моря в современный период	131
<i>Молодых В.А.</i> О 21-летних колебаниях температуры воздуха	146
<i>Козлова Л.Ф.</i> Тренды характеристик тропопаузы по данным радиозондирования в Арктическом регионе	159

CONTENTS

<i>Chernykh I.V., Aldukhov O.A.</i> Longtime Estimations of Boundaries and Thickness of Cloud Layers Reconstructed from Radiosonde Observations for Russian Stations	5
<i>Finaev A.F., Razuvaev V.N.</i> Homogenization of mean monthly precipitation data for meteorological stations of Russia.....	19
<i>Finaev A.F., Razuvaev V.N.</i> Homogenization of Daily Precipitation Data from Meteorological Stations in Russia	34
<i>Kleschenko L.K.</i> The climatic regime of sunshine on the territory of Russia.....	45
<i>Kuznetsova V.N., Shvets N.V.</i> Characteristics of Climate Changes in Relative Air Humidity in Asian Russia for the Period 1966–2021.....	56
<i>Sherstyukov B.G., Sherstiukov A.B.</i> Calculation of prognostic estimates of changes in monthly values of air temperature and precipitation in Russia for two decades	68
<i>Viazilova N.A.</i> The Cyclone Activity Monitoring in the North Atlantic Based on ESIMO Indicators.....	88
<i>Viazilova N.A., Viazilov A.E.</i> Cyclonic activity and atmospheric circulation oscillations in the North Atlantic based on reanalysis ERA5	99
<i>Vorontsov A.A., Batalkina S.A., Bulygin A.M., Nefedova G.I.</i> Salinity Regime of the Black Sea in the Last Five Years.....	111
<i>Vorontsov A.A., Batalkina S.A., Nefedova G.I.</i> Changes in the Thermal Regime of the Active Layer of the Black Sea.....	121
<i>Vorontsov A.A., Nefedova G.I., Batalkina S.A.</i> Trends in the Black Sea Water Density in the Modern Period.....	131
<i>Molodykh V.A.</i> On 21-year Variations of Air Temperature.....	146
<i>Kozlova L.F.</i> Trends in Tropopause Characteristics from Radiosonding Data in the Arctic Region	159

УДК 551.576.1:551.58

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ОЦЕНКИ ГРАНИЦ И ТОЛЩИНЫ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПО РАДИОЗОНДОВЫМ ПРОФИЛЯМ ОБЛАЧНЫХ СЛОЁВ ДЛЯ РОССИЙСКИХ СТАНЦИЙ

И.В. Черных¹, О.А. Алдухов

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,*

¹ *civ@meteo.ru*

Введение

Знания о вертикальной макроструктуре облачности важны для исследований климата атмосферы и его изменений, климатических исследований облачности, при решении задач по прохождению электромагнитных волн, для нужд авиации [1–12]. Исследование вертикальной макроструктуры облачных слоёв, восстановленных по радиозондовым профилям температуры и влажности, вызывает большой интерес, так как данные радиозондовых наблюдений собраны за достаточно длинный период, и станции глобальной аэрологической сети плотно покрывают территорию земного шара [13–15].

Данная работа является логическим продолжением исследований вертикальной макроструктуры облачных слоёв (ОС), восстановленных с помощью СЕ-метода восстановления границ и количества облачности по радиозондовым профилям температуры и влажности [16, 17], полученным при радиозондировании атмосферы, проводимом на аэрологических станциях, расположенных на территории Российской Федерации [7, 18–20].

Предметом исследования в ней является вертикальная макроструктура облачных слоёв в слое атмосферы 0–10 км над уровнем земли. Рассмотрен вопрос о долгопериодных средних годовых значениях параметров облачных слоёв с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода для аэрологических станций, расположенных на территории Российской Федерации и ближнего зарубежья. В качестве параметров ОС выбраны их суммарная

толщина (T_h), высоты нижней ($H_{нг}$) и верхней ($H_{вг}$) границ, повторяемость (F_r). Также приведены оценки для суммарной толщины безоблачных прослоек $T_{h_{бп}}$ между облачными слоями. Получены оценки диапазонов изменений долгопериодных средних годовых значений перечисленных параметров; проведён их анализ. Выполнено сравнение полученных результатов для российских и зарубежных станций из соседних с РФ регионов.

1. Данные и методы

Информационной базой для исследования служили данные 58 аэрологических российских и зарубежных станций в Северном полушарии, расположенных в широтах $39,95-73,50^\circ$ с.ш. и долготах $19,18-203,24^\circ$ в.д., и двух антарктических российских станций из глобального аэрологического массива КАРДС [13], пополненного текущими данными из массивов АЭРОСТАБ [14] и АЭРОСТАС [15]. Данные прошли процедуру комплексного контроля качества [13, 21]. Зарубежные станции были выбраны в соседних с РФ районах. Для возможности сопоставления полученных результатов с результатами, полученными ранее для отдельных категорий станций [7, 18–20], в данном исследовании все станции разделены на несколько категорий (табл. 1).

Таблица 1

Диапазон изменения широты и долготы для использованных в исследовании аэрологических станций

Категория аэрологических станций	Широта, ° с.ш./° ю.ш.	Долгота, ° в.д.
12 станций ГСНК территории РФ	$51,70-73,50^\circ$ с.ш.	$40,50-158,58^\circ$ в.д.
9 арктических станций РФ, не являющихся станциями ГСНК	$66,46-71,35^\circ$ с.ш.	$33,07-123,21^\circ$ в.д.
21 дополнительная станция РФ	$44,13-58,65^\circ$ с.ш.	$20,33-132,05^\circ$ в.д.
2 антарктические российские станции	$66,65-70,75^\circ$ ю.ш.	$11,83-19,71^\circ$ в.д.
14 зарубежных станций из соседних с РФ районов	$39,95-71,28^\circ$ с.ш.	$19,18-203,24^\circ$ в.д.

Для восстановления по вертикальным профилям температуры и влажности параметров облачных слоёв использовался SE-метод определения границ и количества облачности по результатам

радиозондовых наблюдений, разработанный специально для климатических исследований [1, 5–7, 16, 17]. Определение облачных слоёв по СЕ-методу проводится в два этапа.

На первом этапе определяются их границы по вторым производным температуры и относительной влажности по высоте вдоль профилей. Особенности скоростей изменения этих параметров с высотой могут быть обусловлены их изменениями при пересечении радиозондом границ облачных слоёв. За критерий существования облачного слоя приняты условия, которые должны выполняться одновременно:

$$\begin{cases} T''(h) \geq 0, \\ R''(h) \leq 0, \quad h_1 \leq h \leq h_2, \end{cases}$$

где отрезок $[h_1, h_2]$ есть пересечение отрезка $[h_{1,T}, h_{2,T}]$, для которого $T''(h) \geq 0$, и отрезка $[h_{1,R}, h_{2,R}]$, для которого $R''(h) \leq 0$, при этом должно выполняться требование изменения знака соответствующей второй производной на противоположный в граничных точках $[h_{1,T}, h_{2,T}]$ и $[h_{1,R}, h_{2,R}]$. Это означает: точки $h_{1,T}$ и $h_{2,T}$ – точки перегиба профиля T , а $h_{1,R}$ и $h_{2,R}$ – точки перегиба профиля R ; также это означает, что это точки локальных экстремумов первых производных T' и R' (максимума R' в точке $h_{1,R}$ и минимума T' в точке $h_{1,T}$ и, наоборот, минимума R' в точке $h_{2,R}$ и максимума T' в точке $h_{2,T}$). Эти условия были найдены в результате сравнения профилей температуры и относительной влажности и их вторых производных с результатами наземных наблюдений за облаками [1, 17, 22]. Для получения непрерывных вторых производных по всему вертикальному профилю используется аппроксимация наблюдаемых значений температуры и влажности кубическими сплайнами с нулевыми граничными условиями для вторых производных [22, 23].

На втором этапе для каждого из выделенных облачных слоёв по значениям температуры и дефицита точки росы на уровне максимальной относительной влажности внутри такого слоя по кусочно-линейной аппроксимации диаграммы Арабей – Мошникова [1, 17] определяется количество облачности по градациям 0–20, 20–60, 60–80, 80–100 % поверхности небосвода.

Исследования числа облачных слоёв проведены для атмосферных слоёв 0–2, 2–6, 6–10 и 0–10 км над уровнем земли. Согласно принятой в метеорологии классификации облаков [25, 26], первые три из них соответствуют нижнему, среднему и верхнему ярусам облаков.

При расчётах учитывались ОС толщиной не менее 50 м, что обусловлено точностью передаваемых значений температуры и влажности в аэрологической телеграмме [1, 16, 27, 28] (значения температуры T и относительной влажности R в аэрологической телеграмме в соответствии с кодом КН-04 [27] представлены с точностью до 0,1 °С и 0,1 % соответственно). Так как результаты расчётов статистических характеристик границ и толщины могут быть использованы при решении задач, требующих различную точность, расчёты были выполнены по формулам с точностью до 0,1 м и округлены до 1 м.

2. Результаты

2.1. Диапазоны изменений многолетних средних годовых стационарных значений суммарной толщины облачных слоёв в разных слоях атмосферы

В табл. 2 и 3 для исследуемых категорий аэрологических станций приведены диапазоны изменений многолетних средних годовых стационарных значений и соответствующих среднеквадратических отклонений суммарной толщины ОС с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода, определённых с помощью СЕ-метода в разных атмосферных слоях за период наблюдения 1964–2018 гг.

Анализ данных табл. 2 показал, что средние годовые стационарные значения суммарной толщины ОС в слоях 0–2, 2–6, 6–10 и 0–10 км над уровнем земли изменяются в следующих пределах: для российских станций 494–655, 917–1099, 1061–1273 и 2462–2758, а для зарубежных станций – 499–747; 1002–1271; 1073–1383 и 2522–3015 соответственно. Для российских станций в нижнем, среднем, верхнем ярусе и в слое 0–10 км амплитуда изменения средних значений суммарной толщины ОС меньше чем для зарубежных: для российских станций она составляет 161, 182,

212 и 296, а для зарубежных 248, 269, 310 и 493 соответственно. Это можно объяснить большими значениями верхних пределов диапазонов изменения средних значений суммарной толщины ОС для зарубежных станций, при этом значения нижних пределов для российских станций и зарубежных станций различаются мало.

Таблица 2

Диапазоны изменений многолетних средних годовых стационарных значений (Δ , м) суммарной толщины ОС с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферных слоях 0–2, 2–6, 6–10, 0–10 км над уровнем земли для разных категорий станций. 1964–2018 гг.

Категория аэрологических станций	Слой атмосферы			
	0–2 км	2–6 км	6–10 км	0–10 км
	Δ , м	Δ , м	Δ , м	Δ , м
12 станций ГСНК территории РФ	503–620	917–1099	1080–1259	2462–2638
9 арктических станций РФ, не являющихся станциями ГСНК	502–655	938–1016	1180–1273	2536–2758
21 дополнительная станция РФ	539–623	959–1079	1061–1164	2464–2627
2 антарктические станции РФ	494–526	923–949	1161–1194	2498–2599
14 зарубежных станций	499–747	1002–1271	1073–1383	2522–3015
Все изучаемые станции	494–747	917–1271	1061–1383	2462–3015

Таблица 3

Диапазоны изменений многолетних годовых стационарных значений среднеквадратических отклонений ($\Delta\sigma$, м) суммарной толщины ОС с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферных слоях 0–2, 2–6, 6–10, 0–10 км над уровнем земли для разных категорий станций. 1964–2018 гг.

Категория аэрологических станций	Слой атмосферы			
	0–2 км	2–6 км	6–10 км	0–10 км
	$\Delta\sigma$, м	$\Delta\sigma$, м	$\Delta\sigma$, м	$\Delta\sigma$, м
12 станций ГСНК территории РФ	262–378	499–570	552–615	835–1084
9 арктических станций РФ, не являющихся станциями ГСНК	280–370	509–542	598–622	851–913
21 дополнительная станция РФ	277–392	486–550	545–598	840–928
2 антарктические станции РФ	287–309	492–500	550–568	806–836
14 зарубежных станций	246–450	503–669	518–677	829–1020
Все изучаемые станции	246–450	486–669	518–677	806–1084

Диапазоны изменений многолетних годовых стационарных значений среднеквадратических отклонений суммарной толщины ОС в слоях 0–2, 2–6, 6–10 и 0–10 км над уровнем земли составляют (табл. 3) для российских станций 262–392, 486–570, 545–622 и 806–1084 м, а для зарубежных станций – 246–450, 503–669, 518–677 и 829–1020 м; амплитуды изменения среднеквадратических отклонений суммарной толщины ОС составляют для российских станций 130, 84, 77 и 278 м, а для зарубежных – 204, 166, 159 и 191 м соответственно. Для российских станций в нижнем, среднем, верхнем ярусах амплитуда изменения среднеквадратических отклонений толщины ОС меньше, чем для зарубежных. Наибольшее значение среднеквадратических отклонений толщины ОС в слое 0–10 км для российских станций (1084 м) отмечено для станции Туруханск (Красноярский край), а для зарубежных станций (1020 м) – для станции Ереван. Для остальных станций среднеквадратические отклонения не превышают 928 и 924 м для российских и зарубежных станций соответственно.

2.2. Диапазоны изменений многолетних средних годовых стационарных значений суммарной толщины безоблачных прослоек между облачными слоями с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферном слое 0–10 км

В табл. 4 для исследуемых категорий аэрологических станций приведены диапазоны изменений многолетних средних годовых стационарных значений и соответствующих среднеквадратических отклонений суммарной толщины безоблачных прослоек между облачными слоями с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода, определённых с помощью СЕ-метода в атмосферном слое 0–10 км над уровнем земли.

В результате анализа данных табл. 4 установлено, что диапазоны изменений как многолетних средних годовых стационарных значений, так и соответствующих среднеквадратических отклонений суммарной толщины безоблачных прослоек между облачными слоями с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферном слое 0–10 км для российских

и зарубежных станций различаются мало: они составляют для средних значений 2594–3096 и 2616–3225 м, а для среднеквадратических отклонений – 1000–1135 и 931–1126 м соответственно.

Следует отметить, что средние значения суммарной толщины безоблачных прослоек между облачными слоями с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферном слое 0–10 км превышают средние значения суммарной толщины ОС приблизительно на 100–500 м для всех изучаемых станций, за исключением одной российской станции (Хакасская) и пяти зарубежных станций (Бухарест, София, Анкара, Минск, Ереван), для которых они меньше соответствующих средних значений толщины ОС приблизительно на 20–250 м.

Среднеквадратические отклонения суммарной толщины безоблачных прослоек между облачными слоями с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферном слое 0–10 км для каждой из 58 изучаемых станций больше среднеквадратических отклонений суммарной толщины ОС приблизительно на 100–250 м.

Таблица 4

Диапазоны изменений многолетних средних годовых стационарных значений (Δ , м) и соответствующих среднеквадратических отклонений ($\Delta\sigma$, м) суммарной толщины безоблачных прослоек между облачными слоями с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода, определённых с помощью СЕ-метода в атмосферном слое 0–10 км над уровнем земли, для разных категорий станций. 1964–2018 гг.

Категория аэрологических станций	Δ , м	$\Delta\sigma$, м
12 станций ГСНК территории РФ	2594–3085	1021–1135
9 арктических станций РФ, не являющихся станциями ГСНК	2881–3096	1051–1104
21 дополнительная станция РФ	2650–3053	1032–1125
2 антарктические станции РФ	2768–2917	1000–1015
14 зарубежных станций	2616–3225	931–1126
Все изучаемые станции	2594–3225	931–1135

2.3. Диапазоны изменений многолетних средних годовых станционных значений верхней и нижней границ облачных слоёв с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферном слое 0–10 км

В табл. 5 для исследуемых категорий аэрологических станций приведены диапазоны изменений многолетних средних годовых станционных значений и соответствующих среднеквадратических отклонений верхней и нижней границ ОС с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферном слое 0–10 км.

Таблица 5

Диапазоны изменений многолетних средних годовых станционных значений (Δ , м) высот верхней, $H_{НГ}$, и нижней, $H_{ВГ}$, границ ОС с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода, определённых с помощью СЕ-метода, и соответствующих среднеквадратических отклонений ($\Delta\sigma$, м), в атмосферном слое 0–10 км над уровнем земли для разных категорий станций. 1964–2018 гг.

Категория аэрологических станций	Высота нижней границы, $H_{ВГ}$, м		Высота верхней границы, $H_{НГ}$, м	
	Δ , м	$\Delta\sigma$, м	Δ , м	$\Delta\sigma$, м
12 станций ГСНК территории РФ	670–1213	860–1873	9251–9334	916–1163
9 арктических станций РФ, не являющихся станциями ГСНК	744–1116	1099–1608	9298–9385	868–1071
21 дополнительная станция РФ	562–1029	785–1302	9142–9325	1020–1300
2 антарктические станции РФ	815–883	822–884	9289–9320	789–830
14 зарубежных станций	533–1297	939–1578	9147–9490	735–1438
Все изучаемые станции	533–1297	785–1873	9142–9490	735–1438

Анализ данных табл. 5 показал, что многолетние средние годовые станционные значения нижней границы ОС в атмосферном слое 0–10 км над уровнем земли и соответствующие среднеквадратические отклонения изменяются для российских станций в пределах 562–1213 и 785–1873 м, а для зарубежных станций – 533–1297 и 939–1578 м соответственно; для верхней границы ОС они изменяются для российских станций в диапазонах 9142–9385, 789–1300 м, а для зарубежных станций – 9147–9490; 735–1438 м соответственно. Для российских и зарубежных станций амплитуды изменения многолетних средних годовых станционных

значений для нижней границы ОС различаются мало (различие около 110 м): они составляют 651 и 764 м; для верхней границы ОС они также различаются мало (разница 100 м): они составляют 243 и 343 м соответственно.

Амплитуда изменения многолетних стационарных значений среднеквадратических отклонений для нижней границы ОС для российских станций больше, чем для зарубежных станций, приблизительно на 400 м (1088 и 639 м), а для верхней границы, наоборот, для российских станций она меньше, чем для зарубежных станций, приблизительно на 200 м (511 и 703 м).

2.4. Диапазоны изменений средних годовых стационарных значений повторяемости облачных слоёв с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в разных атмосферных слоях

В табл. 6 приведены диапазоны изменений многолетних средних годовых стационарных значений повторяемости ОС с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода, определённых с помощью СЕ-метода, в разных атмосферных слоях для изучаемых категорий аэрологических станций.

Таблица 6

Диапазоны изменений многолетних средних годовых стационарных значений повторяемости, (Δ , %), облачных слоёв с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода в атмосферных слоях 0–2, 2–6, 6–10, 0–10 км над уровнем земли для разных категорий станций. 1964–2018 гг.

Категория аэрологических станций	Слой атмосферы			
	0–2 км	2–6 км	6–10 км	0–10 км
	Δ , %	Δ , %	Δ , %	Δ , %
12 станций ГСНК территории РФ	82,3–94,1	86,9–97,2	96,9–98,4	99,8–100
9 арктических станций РФ, не являющихся станциями ГСНК	83,4–92,4	90,4–94,0	97,5–98,7	99,8–100
21 дополнительная станция РФ	86,7–95,8	92,7–96,9	96,0–98,0	99,9–100
2 антарктические станции РФ	92,6–94,0	95,7–96,9	99,0–99,1	100
14 зарубежных станций	78,9–95,6	87,2–96,9	95,4–99,3	99,9–100
Все изучаемые станции	78,9–95,8	86,9–97,2	95,4–99,3	99,8–100

Анализ данных табл. 6 показал, что амплитуды изменения средних годовых стационарных значений повторяемости ОС с количеством облачности 0–100 % поверхности небосвода для российских и зарубежных станций в слоях 0–2, 2–6, 6–10 и 0–10 км составляют 13,5; 10,3; 3,1; 0,2 % и 16,7; 9,7; 3,9; 0,1 %; различие максимально для нижней облачности (3,2 %) и минимально – для средней облачности (0,6 %), при этом в слое 0–10 км различие составляет 0,1 %. Действительно, в слоях 0–2, 2–6, 6–10 и 0–10 км они изменяются в следующих пределах: для российских станций 82,3–95,8; 86,9–97,2; 96,0–99,1 и 99,8–100 %, а для зарубежных станций – 78,9–95,6; 87,2–96,9; 95,4–99,3 и 99,9–100 % соответственно.

2.5. Обсуждение результатов

Интерпретировать полученные результаты расчётов можно следующим образом. Для слоя атмосферы 0–10 км в течение года характерно расслоение на ОС и прослойки между ними. По данным исследованных категорий станций, как российских, так и зарубежных, оно отмечено в 99,8–100 % наблюдений с данными о температуре и влажности до высоты 10 км. При этом максимальна повторяемость облачных слоёв верхнего яруса: она изменяется в пределах 95,4–99,3, а минимальна – повторяемость облачных слоёв нижнего яруса, она изменяется в пределах 78,9–95,8. Многолетние средние годовые стационарные значения суммарной толщины облачных слоёв в слое 0–10 км изменяется в пределах 2462–3015 м, а соответствующие среднеквадратические отклонения – в пределах 806–1084 м. Амплитуда изменения многолетних средних годовых стационарных значений суммарной толщины ОС в каждом ярусе не превышает 350 м, а соответствующих среднеквадратических отклонений не превышает 200 м. При этом осреднённая суммарная толщина безоблачных прослоек между облачными слоями в слое 0–10 км изменяется в пределах 2594–3225 м.

Сравнение полученных оценок суммарной толщины восстановленных по данным радиозондирования облачных слоёв с использованием СЕ-метода и знаний, полученных в результате анализа данных самолётного зондирования атмосферы другими

авторами за многолетний период наблюдений, показало качественное согласование.

Согласно результатам исследования вертикальной макроструктуры облачности, полученным Л.С. Дубровиной на базе массива сетевого самолётного зондирования на территории СССР за период 1957–1963 гг., для облачной структуры характерны тонкие облачные и широкие безоблачные слои; толщина облачных слоёв в 2–5 раз меньше толщины безоблачных слоёв, что справедливо как для 6-километрового слоя, так и для километровых слоёв атмосферы [29]. В [3] также отмечалось, что при одних и тех же процессах облакообразования положение границ облаков, а, следовательно, и толщина могут быть разными в зависимости от начальных значений влажности и температуры, интенсивности турбулентного обмена, скорости и знака вертикальных движений. Толщина всех форм облаков отличается значительной изменчивостью. Средние квадратические отклонения толщины облачных слоёв близки к средним значениям соответствующих форм облаков. Полученные авторами данные табл. 2 и 3 качественно согласуются с этими результатами.

Примерное постоянство распределения расслоённости облаков в течение года [3] было отмечено А.М. Барановым для фронтальной облачности и А.М. Боровиковым – для облачности, рассматриваемой независимо от синоптических условий. При сравнении результатов расчётов повторяемости следует учитывать, что в среднем самолётное зондирование завышает повторяемость облаков и осадков на 5–10 %, а над некоторыми регионами – до 25 % [3].

Различия в оценках соотношения суммарной толщины ОС и суммарной толщины безоблачных прослоек при сравнении результатов, изложенных выше и полученных другими авторами на основе данных самолётного зондирования, могут быть объяснены различием методик определения слоёв облачности и расчёта, периодов наблюдений, периодичности и регулярности наблюдений [3, 16, 18], обобщением результатов на слой атмосферы 0–10 км.

При сравнении суммарной толщины ОС следует также учитывать, что SE-метод детектирует влажные слои, из которых будут

формироваться облака в течение ближайших нескольких часов (эти слои ещё не фиксируются при наземных наблюдениях за облаками в данный момент из-за малой концентрации облачных частиц, но будут детектированы после формирования, обычно радаром). Метод детектирует влажные слои, которые являются некоторой формой оставшихся облаков после их растекания (через несколько часов) и которые детектируются при самолётном зондировании с помощью прибора для определения изображения облачных частиц [7, 16, 18].

Заключение

На основе данных за 1964–2018 гг. для 58 отобранных российских и зарубежных, расположенных в соседних с РФ районах, аэрологических станций в результате анализа расчётов получены новые знания о вертикальной макроструктуре облачных слоёв, восстановленных по данным радиозондирования с помощью СЕ-метода, в частности о диапазонах изменений многолетних средних годовых значений повторяемости, границ, толщины облачных слоёв с количеством облачности 0–100 % покрытия небосвода и толщины безоблачных прослоек между ними в разных слоях атмосферы.

Статистические характеристики суммарной толщины ОС, их пространственно-временной изменчивости могут быть полезны при изучении радиационной энергетики атмосферы, для оценки условий распространения электромагнитных волн, обеспечения работы авиации, при интерпретации данных измерений параметров облачности другими методами с помощью приборов, расположенных на поверхности земли, или с помощью спутниковой аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдухов О.А., Черных И.В. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 2: Восстановленные облачные слои. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2013. 152 с.
2. Баранов А.М. Облака и безопасность полётов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 231 с.

3. Дубровина Л.С. Облака и осадки по данным самолётного зондирования. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216 с.
4. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
5. Черных И.В., Алдухов О.А. Долгопериодные оценки характеристик вертикального распределения облачных слоёв по данным радиозондирования атмосферы // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 5–17.
6. Черных И.В., Алдухов О.А. Долгопериодные оценки числа облачных слоёв по данным радиозондирования атмосферы за 1964–2017 гг. в разных в широтных зонах // Метеорология и гидрология. 2020. № 4. С. 18–32.
7. Черных И.В., Алдухов О.А. Оценки числа облачных слоёв по данным радиозондирования атмосферы за 1964–2014 гг. на российских станциях // Метеорология и гидрология. 2018. № 3. С. 29–39.
8. Ferlay N., Thieuleux F., Cornet C. et al. Toward new inferences about cloud structures from multidirectional measurements in the Oxygen A Band: Middle-of-cloud pressure and cloud geometrical thickness from POLDER-3/PARASOL // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2010. Vol. 49. P. 2492–2507.
9. Naud C.M., Muller J.P., Clothiaux E.E. Comparison between active sensor and radiosonde cloud boundaries over the ARM Southern Great Plains site // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, N D4. P. 3-1–3-12.
10. Poore K.D., Wang J., Rossow W. Cloud layer thickness from a combination of surface and upper-air observations // J. Climate. 1995. Vol. 8. P. 550–568.
11. Rossow W.B., Zhang Y., Wang J. A statistical model of cloud vertical structure based on reconciling cloud layer amounts inferred from satellites and radiosonde humidity profiles // J. Climate. 2005. Vol. 18. P. 3587–3605.
12. Stephens G., Winker D., Pelon J. et al. CLOUDSAT and CALIPSO within the A-TRAIN ten years of actively observing the earth system // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2018. Vol. 99. P. 569–581.
13. Eskridge R.E., Alduchov O.A., Chernykh I.V. et al. A comprehensive aerological reference dataset (CARDS): rough and systematic errors // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1995. Vol. 76. P. 1759–1775.
14. Алдухов О.А., Оржеховская В.А., Садовникова Т.О. и др. Архив текущей аэрологической информации АЭРОСТАБ. Описание архива. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1990. 28 с.
15. Руденкова Т.В. Формат архивации текущих аэрологических данных, поступающих по каналам связи для ПЭВМ // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 174. С. 41–63.
16. Черных И.В., Алдухов О.А. Об определении вертикального распределения облачных слоёв по данным радиозондирования атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 1. С. 45–59.

17. *Chernykh I.V., Eskridge R.E.* Determination of cloud amount and level from radiosonde soundings // *J. Appl. Meteorol.* 1996. Vol. 35. P. 1362–1369.

18. *Алдухов О.А., Черных И.В.* Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 3: Влажность и температура в атмосфере: статистические характеристики. Обнинск: ВНИИГМИ–МЦД, 2015. 494 с.

19. *Черных И.В., Алдухов О.А.* Долгопериодные пространственно-временные изменения числа восстановленных по радиозондовым профилям облачных слоёв для российских станций // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2020. Вып. 187. С. 34–60.

20. *Черных И.В., Алдухов О.А.* Оценки параметров вертикальной макроструктуры облачных слоёв по данным радиозондирования атмосферы на аэрологических станциях ГСНК территории РФ за 1964–2017 гг. // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2018. Вып. 183. С. 5–19.

21. *Алдухов О.А., Черных И.В.* Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 1: Контроль качества и обработка данных. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2013. 306 с.

22. *NCDC.* TD-3280 Surface Airways Hourly. Internal Report of the National Climatic Data Center. NCDC. 1991. 40 p.

23. *Стечкин С.Б., Субботин Ю.Н.* Слайны в вычислительной математике. М.: Наука, 1976. 248 с.

24. *Де Бор К.* Практическое руководство по слайнам. М.: Радио и связь, 1985. 304 с.

25. *Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалюк Ю.А. и др.* Атлас облаков. Санкт-Петербург: Д’АРТ, 2011. 248 с.

26. *World Meteorological Organization.* International Cloud Atlas. Geneva: WMO, 1956. 72 plates. 62 p.

27. *Наставление* гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 4: Аэрологические наблюдения на станциях. Ч. 3а: Температурно-ветровое зондирование атмосферы системой «Метеорит» – РКЗ. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 256 с.

28. *Зайцева Н.А.* Аэрология. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 325 с.

29. *Дубровина Л.С.* Структура облаков и осадков нижней и средней тропосферы по данным самолётного зондирования: Автореф. дис. на соискание учёной степени д-ра геогр. наук. Л., 1984.

УДК 551.524

ГОМОГЕНИЗАЦИЯ ДАННЫХ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ОСАДКОВ ПО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ СТАНЦИЯМ РОССИИ

А.Ф. Финаев¹, В.Н. Разуваев

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,*

¹ afinaev@meteo.ru

Введение

Атмосферные осадки являются важным компонентом основных метеорологических характеристик, используемых для оценки изменения климата. В отличие от температуры воздуха, выпадение осадков происходит не постоянно, в результате чего фиксация этого параметра атмосферы фрагментарна во времени и пространстве. Кроме того, в результате некоторых причин могут возникать нарушения однородности ряда данных, например из-за перемещения пункта измерения, модификации конструкции прибора, перерыва в наблюдениях, технических ошибок и др. Поэтому необходимо исключить из ряда данных те факторы, которые не связаны с метеорологическими флуктуациями в атмосфере. Однородные данные осадков широко используются в различных направлениях климатических исследований во многих странах мира, например в Норвегии такие данные использовали для расчёта климатических норм [1], а в Китае применили в гидрологических исследованиях речного стока [2]. Наиболее востребованными являются однородные данные суммы осадков за месяц.

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) предоставляет пользователям записи температурных рядов 518 станций на территории России [3]. Этот массив данных проверен на качество и подготовлен для использования [4]. Причины неоднородности данных неоднократно

обсуждались сотрудниками института, однако тесты на однородность и вычисления однородных рядов не выполнялись [4, 5].

Настоящая статья посвящена методам получения однородных данных суммы среднемесячных осадков за весь период инструментальных наблюдений на каждой из 518 метеорологических станций России.

Данные и методы

Исходным материалом послужили данные сумм суточных осадков на 518 станциях России, представленные в виде текстовых файлов. Записи этих станций охватывают хронологический ряд с 1874 по 2018 год. Название каждого файла соответствует синоптическому индексу станции (ID).

Количество работающих метеорологических станций за период инструментальных наблюдений постоянно менялось (рис. 1). С 1874 по 1880 год работала всего одна станция (ID 37099 – Сочи). В последующие годы их число сильно увеличилось, что было связано с государственными программами развития наблюдений в гидрометеорологической службе. Такие изменения имели место в 1935 г., когда число измерительных пунктов за год повысилось от 151 до 298; в 1958 г. их число выросло с 402 до 481, а в 1965 г. – увеличилось на 13 и достигло 515. В дальнейшем наблюдения за осадками выполнялись на 517 станциях и резких изменений

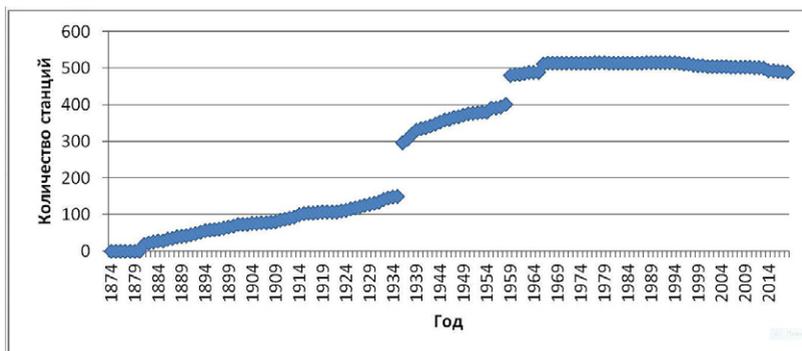


Рис. 1. Количество работающих метеорологических станций в различные годы

в их количестве не происходило. К концу исследуемого периода (2018 год) общее число пунктов измерения снизилось до 490.

На взгляд авторов настоящей статьи, для получения однородных рядов суммы месячных осадков наиболее оптимальным является выполнение гомогенизации с помощью программного пакета Rhtests [6]. Пакет Rhtests разработан Центром исследований климата Министерства окружающей среды Канады и одобрен Комиссией по климатологии при ВМО для выполнения гомогенизации метеорологических данных [6, 7]. С помощью этой программы можно тестировать и корректировать неоднородные ряды метеорологических записей в масштабе года, месяца и дня [8]. Однако для осадков суточного разрешения пакет Rhtests применять нельзя из-за большой фрагментарности осадков по времени и месту выпадения. Подсчёт сумм суточных осадков за месяц устраняет эту проблему, после чего пакет Rhtests можно использовать для гомогенизации суммы месячных осадков.

В ходе подготовки данных к процедуре гомогенизации на основе исходных суточных записей были подсчитаны месячные суммы осадков по всем исследуемым станциям. Месяцы с отсутствием наблюдений (код -99,9) в какие-либо дни в расчётах не учитывались, а фиксировались как пропуск за целый месяц.

На следующем этапе была выполнена гомогенизация сумм среднемесячных осадков с помощью пакета Rhtests в программной среде R (что не следует путать с «R» – обозначением осадков, принятым в ГМС) на каждой из 518 станций.

Результаты

При работе программы Rhtests в выходном каталоге создаются 5 файлов со статистическими параметрами и однородными рядами исследуемой климатической характеристики. В эти файлы выводится результат гомогенизации данных сумм среднемесячных осадков по каждой станции:

1. OutFile_1Cs.txt – где вместо OutFile подставляется название (индекс) станции, аналогичный входному файлу. В файле представлены количество и даты смещений (разрывов) ряда, индексы значимости и некоторые другие характеристики.

2. OutFile_mCs.txt – является дубликатом файла OutFile_1Cs.txt, предназначен для введения корректировок оператором и используется в повторном тестировании с учётом сделанных изменений.

3. OutFile_U.dat – этот файл содержит:

- 1 – колонка – Номер строки в этом файле;
- 2 – колонка – Data – даты наблюдения в формате YYYYMMDD;
- 3 – колонка – R – исходный базовый ряд;
- 4 – колонка – Trend – линейный тренд базового ряда и его сдвиги;
- 5 – колонка – Rhgn – скорректированный базовый ряд;
- 6 – колонка – Anomal – базовый ряд аномалий (т. е. базовый ряд с вычтенным среднегодовым циклом);
- 7 – колонка – ReA – многофазная регрессия ряда аномалий;
- 8 – колонка – Cycle – расчётный средний годовой цикл вместе с линейным трендом и средними сдвигами;
- 9 – колонка – Rqm – базовый ряд с корректировкой QM;
- 10 – колонка – Regress – модель многофазной регрессии, соответствует несезонированному базовому ряду без учёта сдвигов.

4. OutFile_U.pdf – в этом файле сохраняются пять графиков. В качестве примера можно привести результаты гомогенизации данных по метеостанции о. Визе (файл 20069_U.pdf), (рис. 2–6).

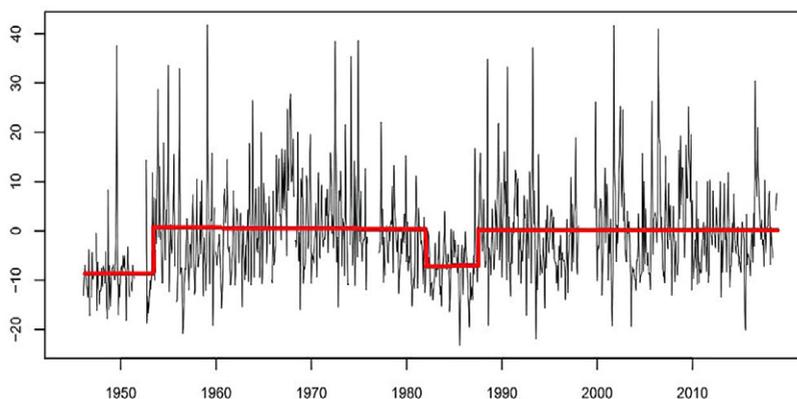


Рис. 2. Базовый ряд аномалий (относительно среднего годового цикла базового ряда) вместе с моделью многофазной регрессии, метеорологическая станция о. Визе

5. OutFile_Ustat.txt – в дополнение ко всем результатам, хранящимся в файле OutFile_1Cs.txt, этот выходной файл содержит оценки параметров соответствия $(Nc+1)$ – фазной модели регрессии, включая размеры идентифицированных средних сдвигов, линейный тренд и автокорреляцию лаг-1 базовой серии.

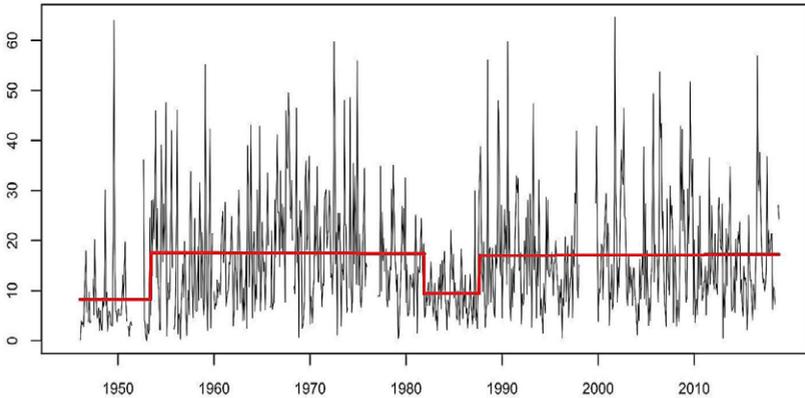


Рис. 3. Базовый ряд со средними сдвигами и линейным трендом, метеорологическая станция о. Визе

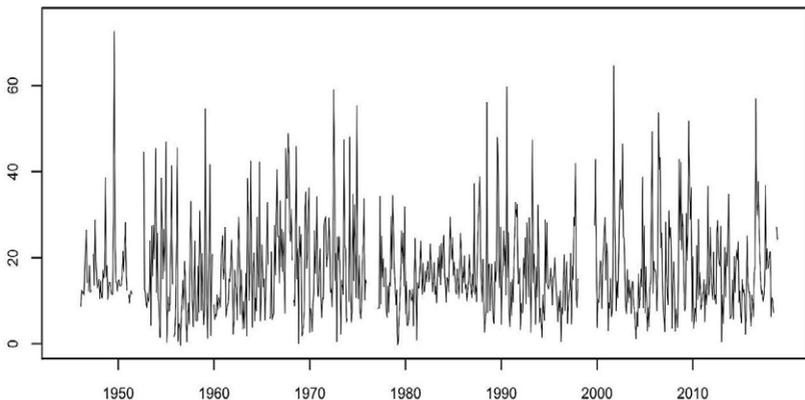


Рис. 4. Ряд, скорректированный по средней базовой серии, метеорологическая станция о. Визе

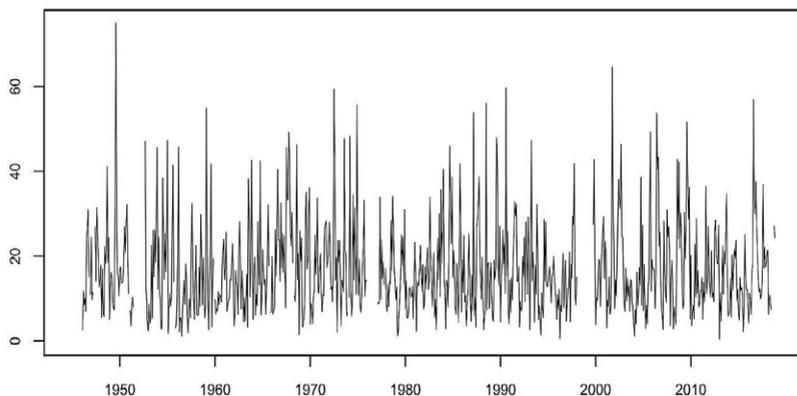


Рис. 5. Ряд, скорректированный по QM, метеорологическая станция о. Визе

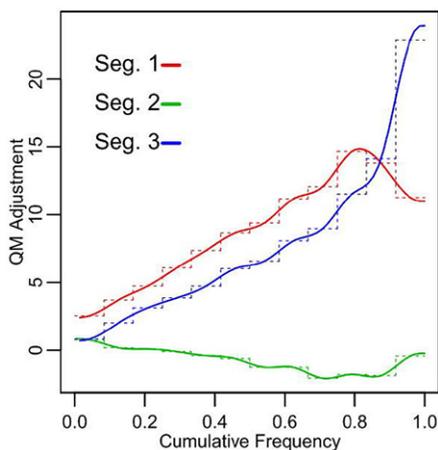


Рис. 6. Распределение корректировок по QM, метеорологическая станция о. Визе. $Mq=12$ (Mq = число квантилей)

Анализ результатов тестирования сумм среднемесячных осадков на 518 станциях показал, что:

- 342 (66 %) станции имеют однородные ряды данных, которые в коррекции не нуждаются;
- 176 (34 %) станций имеют нарушения однородности; была выполнена автоматическая коррекция, в результате чего получены однородные ряды среднемесячных осадков.

В некоторых случаях для подтверждения изменений использовались метаданные станций. Однако эта информация ограничена только датами о перемещении станции и перерывами в рядах наблюдений.

Количество разрывов в рядах данных в течение периода наблюдений на разных станциях менялось от одного до шести (табл. 1). Наибольшее количество станций (115) имеют только один разрыв в ряду данных среднемесячных осадков, а на двух станциях выявлены пять и шесть разрывов.

Таблица 1

Количество нарушений однородности в рядах данных среднемесячных осадков на метеостанциях (Err – количество нарушений однородности; S – количество станций)

Err	0	1	2	3	4	5	6
S	342	115	42	13	4	1	1

Распределение метеостанций с нарушениями однородности по территории России не равномерно (рис. 7). Наибольшее количество пропусков в рядах данных отмечается на труднодоступных

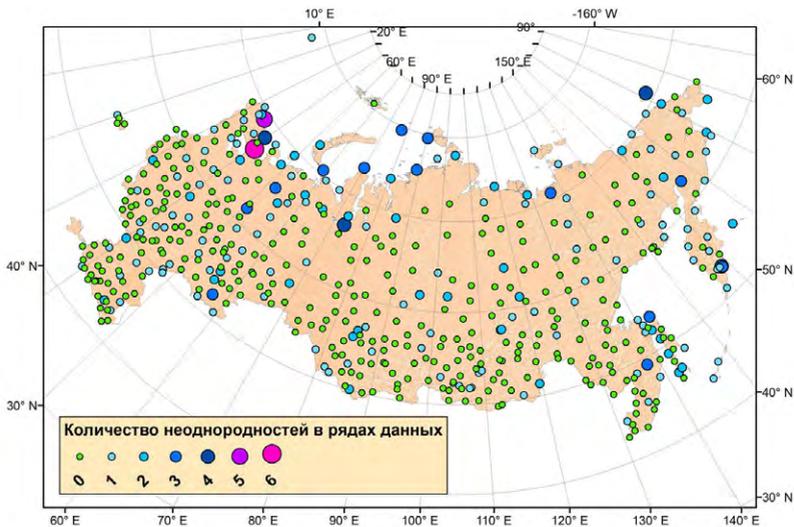


Рис. 7. Количество неоднородностей в рядах данных среднемесячных осадков на метеорологических станциях России

станциях, расположенных в горных, полярных и прибрежных районах. Вероятнее всего, это связано с суровыми природно-климатическими условиями, что сказывается на возможностях работы персонала станций (пропуски в наблюдениях) и нестабильности окружающей среды (изменение места установки приборов) в этих метеорологических пунктах.

В табл. 2 представлено среднее количество осадков по станциям России в различные месяцы года. Эти результаты получены на основе расчёта исходных (неоднородных) и гомогенизированных данных.

Таблица 2

Среднее количество осадков по данным 518 станций России, мм/мес

R (исходные, неоднородные данные)												
Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Min	2	1	2	4	6	10	15	15	9	4	3	3
Max	211	167	168	160	149	190	268	227	173	199	216	230
Mean	25	20	22	28	40	56	70	69	54	44	35	30
Rhgn (однородные данные, коррекция методом HGN)												
Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Min	-14	-15	-11	-4	0	7	10	12	9	4	-6	-13
Max	211	167	168	160	149	190	268	227	191	199	216	230
Mean	26	20	22	28	40	56	70	69	54	44	36	30
Rqm (однородные данные, коррекция методом QM)												
Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Min	-2	-7	-1	-1	3	9	10	12	9	4	1	-1
Max	211	167	168	160	149	190	268	227	204	199	216	230
Mean	26	20	22	28	40	56	70	69	54	44	36	31

Примечание: зелёным цветом выделены неоднородные данные (R); жёлтым цветом отмечены результаты коррекции, имеющие различия согласно методам гомогенизации HGN и QM; серым цветом показаны некорректные результаты расчётов программы RHtests из-за малого количества осадков.

В холодную половину года (с ноября по апрель) из-за мизерного количества осадков результаты гомогенизации показали отрицательные величины минимальных осадков, что не является корректным. С мая по август минимальное количество осадков было откорректировано. В этот период результаты гомогенизации

методами HGN и QM оказались различными для мая и для июня. Вероятно, что при малом количестве осадков (7 мм/мес и менее) используемый метод гомогенизации не корректен и его не следует применять.

Максимальные величины по результатам гомогенизации соответствуют максимальным измеренным осадкам. Только для сентября была выполнена коррекция. Результаты в этом случае имеют различия между методами по модели HGN и QM.

Результаты гомогенизации сумм среднемесячных осадков в январе и ноябре имеют отличия от исходных данных на 1 мм/мес, они также были откорректированы.

Имеющиеся данные станций не могут отразить распределение осадков по всей территории России, которая слишком большая. Осадки выпадают фрагментарно и не образуют непрерывных полей, как, например, температура воздуха или давление. Исследуемые пункты наблюдений в основном расположены на больших дистанциях между собой. Только 6 станций находятся друг от друга на расстоянии менее 20 км; 39 % станций расположены на расстоянии до 100 км; между остальными станциями (61 %) расстояние меняется от 100 км до более чем 500 км [9]. По этой причине реально оценить поля осадков на исследуемой территории не всегда возможно.

Для оценки распределения осадков по всей территории России на основе результатов гомогенизации данных станций было выполнено моделирование полей осадков. Расчёт выполнялся с использованием программы ArcGIS и интерполяционного метода Кригинга [10]. Интерполяционная модель учитывает не только метеорологические данные измерительного пункта, но и его весовой вклад в зависимости от расстояния от других пунктов. В результате были получены средние месячные и годовые поля неоднородных и однородных данных (13 карт – неоднородные данные; 13 карт – коррекция методом HGN; 13 карт – коррекция методом QM) для всей исследуемой территории с разрешением примерно 15,66×15,66 км. Размер ячейки выходного растра определяется автоматически в зависимости от расстояния между станциями и их количества.

На рис. 8 представлены карты среднемесячных осадков по сезонам года, рассчитанные на основе исходных и гомогенизированных (QM) данных. Визуальный анализ показывает отличия распределения осадков на исследуемой территории между картами, построенными по неоднородным данным (слева), и картами, построенными по однородным данным (справа).

Статистические данные моделированных карт позволяют оценить среднемесячное количество осадков на территории России за весь период инструментальных наблюдений (табл. 3).

Таблица 3

Среднее количество осадков на территории России согласно картам, моделированным по данным 518 станций, мм/мес

R (исходные, неоднородные данные)												
Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Min	3	2	4	7	10	21	27	21	23	10	6	4
Max	92	73	76	82	97	108	144	143	117	119	94	103
Mean	21	16	17	22	33	50	64	62	48	39	30	25
Std dev.	11	8	9	10	13	15	19	19	14	14	13	12
Rhgn (однородные данные, коррекция методом HGN)												
Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Min	3	2	3	6	11	21	25	20	21	11	6	4
Max	90	71	74	78	96	107	143	144	127	128	108	101
Mean	21	17	18	22	34	51	64	63	48	38	30	25
Std dev.	11	8	9	9	13	14	18	18	14	15	13	12
Rqm (однородные данные, коррекция методом QM)												
Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Min	3	2	3	5	11	22	24	21	21	11	6	4
Max	90	71	74	83	96	107	143	144	132	132	109	101
Mean	21	17	18	22	34	51	64	63	48	39	30	25
Std dev.	11	8	9	9	13	14	18	18	14	15	13	12

Примечание: зелёным цветом выделены неоднородные данные (R); жёлтым цветом отмечены результаты коррекции, имеющие различия согласно методам гомогенизации HGN и QM.

Минимальные осадки откорректированы с марта по октябрь. Максимальные осадки откорректированы по всем месяцам, в результате чего сглажены пики и провалы. Среднемесячные осадки

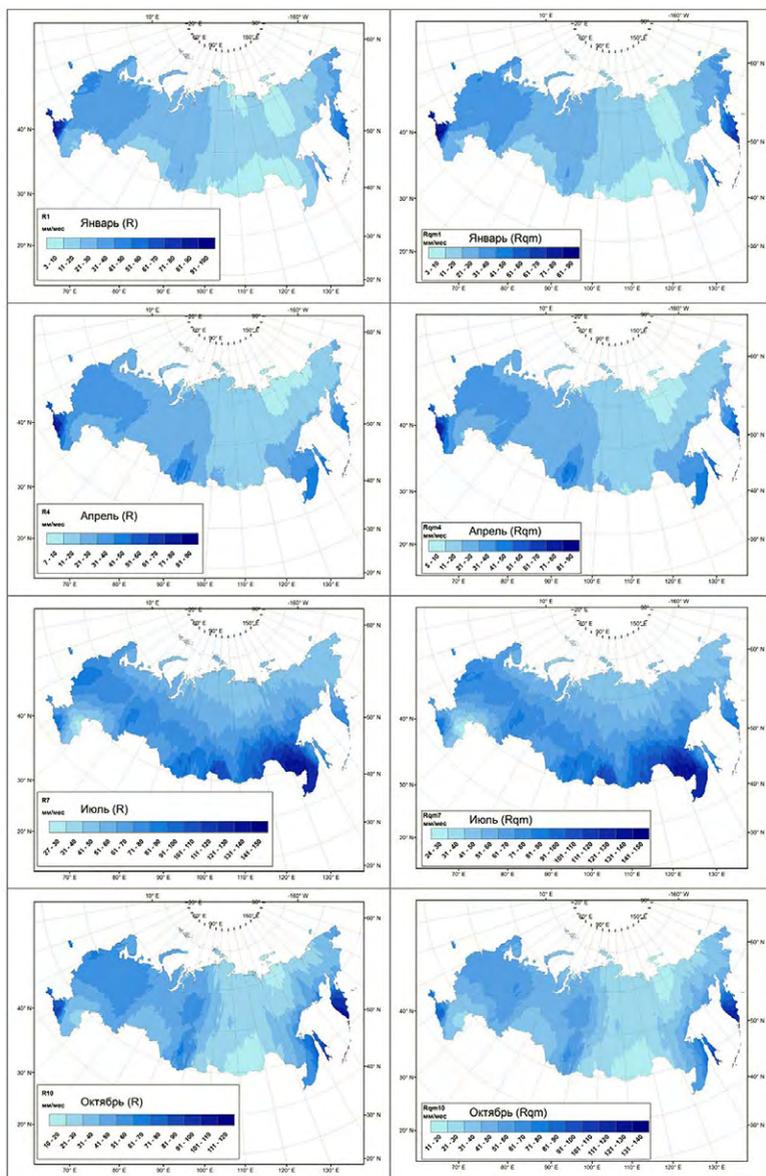


Рис. 8. Поля среднемесячных осадков согласно исходным (R) и гомогенизированным (Rqm) данным (4 сезона года)

откорректированы в феврале, марте, мае, июне и августе. Данные в остальных месяцах в коррекции не нуждались.

На следующем этапе работы были рассчитаны годовые суммы осадков со станций по гомогенизированным и исходным среднемесячным данным, а затем построены карты годового распределения осадков по территории России для исходных и скорректированных (QM) данных (рис. 9).

Сравнительный анализ карт, построенных по исходным (неоднородным) и гомогенизированным (однородным) данным выявил различия в распределении осадков на исследуемой территории (рис. 9).

Статистические характеристики этих карт (табл. 4) показывают, что согласно однородным данным минимальная сумма годовых осадков на 4,3–4,5 % выше, а максимальная на -1,7...-2,0 % ниже суммы, рассчитанной по исходным данным станций. Средняя годовая сумма осадков, рассчитанная на основе однородных данных, на 2,1–2,2 % выше, чем по исходным данным станций, что составляет 9 мм/год. Объем этих недооценённых осадков по всей территории России равен 153 км³/год. В пример можно привести аналогичные исследования осадков в Норвегии, которые показали, что средний годовой линейный тренд однородного ряда увеличился на 2,85 % и был на 0,8 % выше, чем по неоднородным данным за десятилетие [1]. Это подтверждает увеличение количества осадков, рассчитанных по однородным данным.

Таблица 4

Среднее количество осадков за год на территории России, согласно исходным (R_y) и гомогенизированным ($R_y\text{-hgn}$, $R_y\text{-qm}$) данным, мм/год, и процент их изменения после корректировки

Параметр	$R_y\text{-m}$	$R_y\text{-hgn}$	$R_y\text{-qm}$	$dR_y\text{-hgn}$, %	$dR_y\text{-qm}$, %
Min	191	200	199	4,5 %	4,3 %
Max	1110	1091	1088	-1,7 %	-2,0 %
Mean	423	432	432	2,1 %	2,2 %
Std dev.	127	120	120	-	-

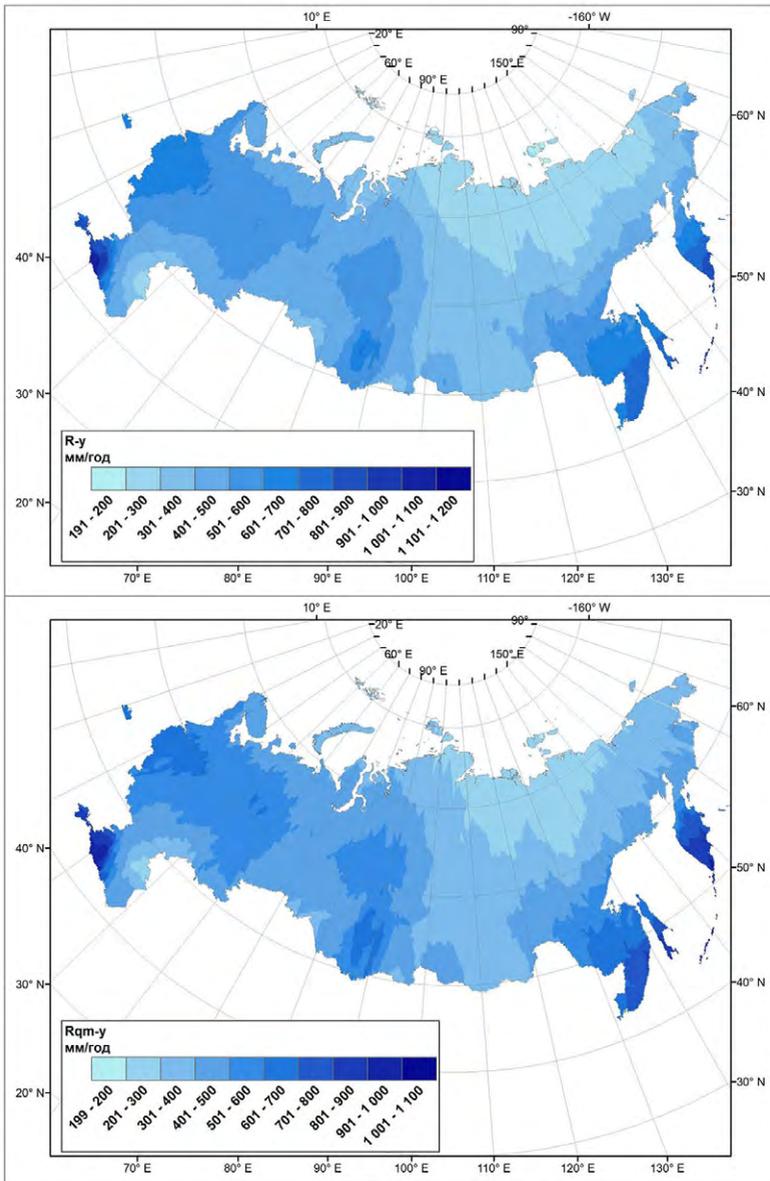


Рис. 9. Поля суммы среднегодовых осадков согласно исходным (R) и гомогенизированным (Rqm) данным

Заключение

Однородные ряды месячных осадков имеют важное значение для оценки климатических изменений. Исследование рядов суточных осадков на 518 метеорологических станциях России позволило рассчитать суммы среднемесячных осадков за весь период инструментальных наблюдений. В результате последующей гомогенизации этих данных с использованием программного пакета Rhtests были получены однородные ряды сумм месячных осадков. Построенные на их основе карты помогли выявить различия в распределении осадков по территории России. Сравнение статистических данных модельных карт показало, что по однородным данным количество осадков на 2,1–2,2 % больше, чем по неоднородным. Полученные результаты необходимо учитывать и использовать в дальнейшем для оценки изменения климата в разных временных интервалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuya E.K., Gjeltten H.M., Tveito O.E.* Homogenization of Norwegian monthly precipitation series for the period 1961–2018 // *Adv. Sci. Res.* 2022. V. 19. P 73–80. ULR: <https://doi.org/10.5194/asr-19-73-2022>. (дата обращения: 08.08.2022).
2. *Qiang Zhang, Xihui Gu, Vijay P. Singh, Chong-Yu Xu, Dongdong Kong, Mingzhong Xiao, Xiaohong Chen.* Homogenization of precipitation and flow regimes across China: Changing properties, causes and implications // *J. of Hydrology.* 2015. V. 530. P 462–475. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415007246?via%3Dihub> (дата обращения: 05.08.2022).
3. Сайт ВНИИГМИ-МЦД: <http://www.meteo.ru>.
4. *Разуваев В.Н.* Из истории климатических исследований во ВНИИГМИ-МЦД // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2014. Вып. 177. С. 28–69.
5. *Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н.* Специализированные массивы данных для климатических исследований // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2014. Вып. 177. С. 136–148.
6. *Финаев А.Ф., Разуваев В.Н.* Гомогенизация климатических рядов на примере среднемесячной температуры воздуха // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2020. Вып. 186. С. 57–68.
7. *WMO Commission for Climatology* // URL: www.climatol.eu/tt-hom (дата обращения: 12.05.2022).

8. Wang X.L., Feng Y. RHtestsV4 User Manual // Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada. 29 pp. ULR: http://etccdi.pacificclimate.org/RHtest/RHtestsV4_UserManual_10Dec2014.pdf (дата обращения: 17.02.2021).

9. Финаев А.Ф., Разуваев В.Н. Оценка результатов гомогенизации температуры воздуха по данным станций России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2020. Вып. 187. С. 158–169.

10. ESRI ArcMap. Как работает инструмент Кригинг (Kriging). ULR: desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm (дата обращения: 05.08.2022).

УДК 551.524

ГОМОГЕНИЗАЦИЯ ДАННЫХ СУТОЧНЫХ ОСАДКОВ ПО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ СТАНЦИЯМ РОССИИ

А.Ф. Финаев¹, В.Н. Разуваев

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,*

¹ afinaev@meteo.ru

Введение

Атмосферные осадки являются важным компонентом, используемым для оценки климата. В отличие от температуры воздуха, выпадение осадков происходит не постоянно, в результате чего фиксация этого параметра атмосферы фрагментарна во времени и пространстве. Кроме того, в результате некоторых причин могут возникать нарушения однородности ряда данных, например из-за перемещения пункта измерения, модификации конструкции прибора, перерыва в наблюдениях, технических ошибок и др. Поэтому необходимо исключить или откорректировать из ряда данных те значения, которые не связаны с метеорологическими флуктуациями в атмосфере.

Однородные данные осадков широко используются в различных направлениях климатических исследований во многих странах мира. Например, в Норвегии такие данные использовали для расчёта климатических норм [1], а в Китае применили в гидрологических исследованиях речного стока [2]. Наиболее востребованными являются однородные данные суммы осадков за месяц, однако в некоторых случаях для исследования климата необходимы суточные данные.

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) предоставляет пользователям записи рядов осадков 518 станций на территории России [3]. Этот массив данных проверен на качество и подготовлен для использования [4].

Причины неоднородности данных неоднократно обсуждались сотрудниками института, однако тесты на однородность и вычисления однородных рядов не проводились [4, 5].

Настоящая статья посвящена методам получения однородных данных суммы среднесуточных осадков за весь период инструментальных наблюдений на каждой из 518 метеорологических станций России. Количество работающих метеорологических станций за период инструментальных наблюдений постоянно менялось [6].

Данные и методы

Как показано в более ранних статьях [7, 8], для получения однородных рядов метеорологических данных наиболее оптимальным является выполнение гомогенизации с помощью программного пакета RHtests. Пакет RHtests разработан Центром исследований климата Министерства окружающей среды Канады и одобрен комиссией по климатологии при ВМО для выполнения гомогенизации метеорологических данных [9, 10]. С помощью этой программы можно тестировать и корректировать неоднородные ряды метеорологических записей в масштабе года, месяца и дня.

Однако для осадков суточного разрешения пакет RHtests применять нельзя из-за большой фрагментарности осадков по времени и месту выпадения. В связи с этим был разработан программный пакет RHtests_dlyPrcp, который специально приспособлен для гомогенизации рядов данных суточных осадков [11]. В пакете RHtests_dlyPrcp, как и в RHtests, используется метод квантильного соответствия (QM – Quantile-Matching), но кроме этого интегрируется процедура адаптивного преобразования данных Бокса-Кокса (Box-Cox transformed – bc) в алгоритм PMFred [12]. Алгоритм PMFred основан на максимальных штрафных санкциях [13], и в случае выполнения гомогенизации используется «без эталонной серии», в отличие от пакетов RHtestsV3 и RHtestsV4.

Преобразование Бокса-Кокса необходимо, поскольку суточное количество осадков сильно различается как в пространстве, так и во времени. Суточные осадки не являются непрерывным

процессом, поэтому могут существовать разрывы в частоте их выпадения. Решать проблему с разрывами следует в первую очередь, чтобы не усложнять гомогенизацию временных рядов данных суточных осадков. Для получения более подробной информации см. Раздел 6 в [11].

Исходным материалом для текущего исследования послужили данные сумм суточных осадков на 518 станциях России, представленные в виде текстовых файлов. Записи этих станций охватывают хронологический ряд с 1874 по 2018 год. Название каждого файла соответствует синоптическому индексу станции (ID).

Результаты

В настоящей работе была выполнена автоматическая коррекция исследуемых данных, в результате чего получены однородные ряды среднесуточных осадков. Анализ результатов гомогенизации показал, что:

- 121 (23 %) станция имеет однородные ряды данных, которые в коррекции не нуждаются;
- 397 (77 %) станций имеют нарушения однородности.

Количество нарушений однородности на станциях менялось от одного до пятнадцати (рис. 1).



Рис. 1. Количество станций и количество коррекций нарушений однородности данных суточных осадков

При работе программы RHtests_dlyPrsp в выходном каталоге для каждой станции создаются 5 файлов, куда и выводится результат гомогенизации сумм суточных осадков:

1. Файл OutFile_1Cs.txt – где вместо OutFile подставляется название (индекс) станции, аналогичный входному файлу. В полученном файле представлены количество и даты смещений (разрывов) ряда, индексы значимости и некоторые другие характеристики. В качестве примера можно привести результаты гомогенизации данных суточных осадков по метеостанции Архангельск (22550). Информационный файл (22550_1Cs.txt) показывает, что ряд данных имеет два случая нарушения однородности (1886.11.09 и 1911.11.11).

2. OutFile_mCs.txt – является дубликатом файла OutFile_1Cs.txt, предназначен для введения корректировок оператором и используется в повторном тестировании с учётом сделанных изменений.

3. OutFile_U.dat – этот текстовый файл содержит полные результаты гомогенизации данных станции, представленные в таблице.

Т а б л и ц а

Расшифровка колонок таблицы текстового файла OutFile_U.dat

Колонка	Индекс	Описание
1	No	номер строки
2	Date	Дата
3	R	исходный ряд осадков
4	Rt	линейный тренд и средние смещения ряда осадков
5	Rqm	осадки с поправкой на QM
6	Rhgn	скорректированные осадки
7	Rqmt	линейный тренд и средние сдвиги ряда осадков с поправкой на QM
8	Rbc	Бокса-Кокса преобразование исходного ряда осадков
9	Rbct	линейный тренд и средние сдвиги преобразованных по Боксу-Коксу исходных рядов осадков
10	Rbcc	скорректированный ряд осадков, преобразованный по Боксу-Коксу
11	Rbctc	линейный тренд ряда осадков, скорректированных по Боксу-Коксу
12	ErrRqm	разница между рядом с корректировкой QM и исходным рядом (R)
13	ErrRhgn	разница между скорректированным рядом (Rhgn) и исходным рядом (R)

4. В файле 22550_U.pdf – сохраняются пять графиков (рис. 2–9), характеризующих данные файла 22550_U.dat.

Количество итоговых графиков для каждой станции может меняться в зависимости от количества нарушений однородности в ряду данных. В рассматриваемом примере выявлены две даты нарушения однородности. Для каждой точки (даты) этого нарушения представлены два графика – оригинальные данные (рис. 2 и 3) и преобразование Бокса-Кокса (IBS) (рис. 4 и 5). На этих графиках также указана конкретная дата нарушения. Кроме того приведены графики данных за весь период наблюдений: оригинальные данные (рис. 6); данные, скорректированные по QM (рис. 7); данные, скорректированные по IBS (рис. 8). В заключение показан график распределения поправок QM (рис. 9).

5. Выходной файл OutFile_Ustat.txt содержит оценки параметров соответствия ($Nc+1$) - фазной модели регрессии, включая размеры идентифицированных средних сдвигов, линейный тренд и автокорреляцию лага-1 базовой серии.

В некоторых случаях для подтверждения изменений использовались метаданные станций. Однако эта информация ограничена только датами о перемещении станции и перерывами в рядах наблюдений.

Распределение метеостанций с нарушениями однородности по территории России различно (рис. 10). Наибольшее количество пропусков в рядах данных отмечается на труднодоступных станциях, расположенных в горных, полярных и прибрежных районах. Вероятнее всего, это связано с суровыми природно-климатическими условиями, что сказывается на возможностях работы персонала станций (пропуски в наблюдениях), и нестабильностью окружающей среды (изменение места установки приборов) в этих метеорологических пунктах.

Сравнение с результатами гомогенизации суммы среднемесячных осадков показало, что гомогенизация суммы суточных осадков выявила большее количество нарушений однородности. Это связано с тем, что при гомогенизации суточных данных используются все имеющиеся в архиве данные. При получении однородных рядов месячных осадков, месяцы, имеющие пропуски суточных наблюдений, из расчёта исключаются (рис. 11).

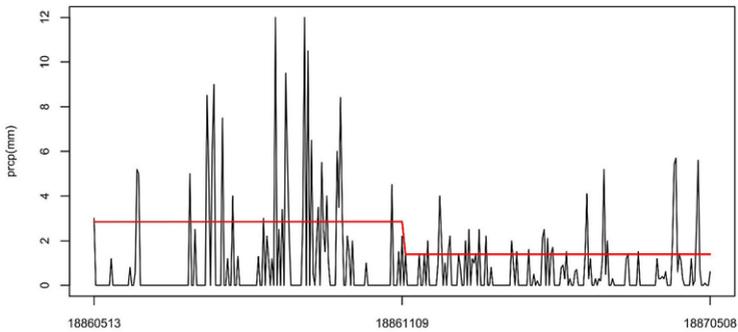


Рис. 2. Оригинальная серия осадков за сутки. Точка 1 – изменение однородности 1886.11.09 (м.с. Архангельск)

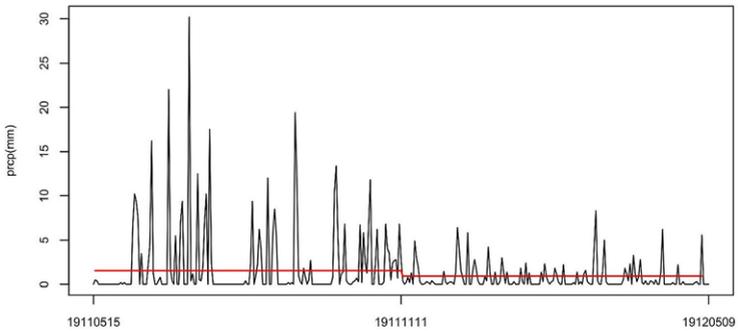


Рис. 3. Оригинальная серия осадков за сутки. Точка 2 – изменение однородности 1911.11.11 (м.с. Архангельск)

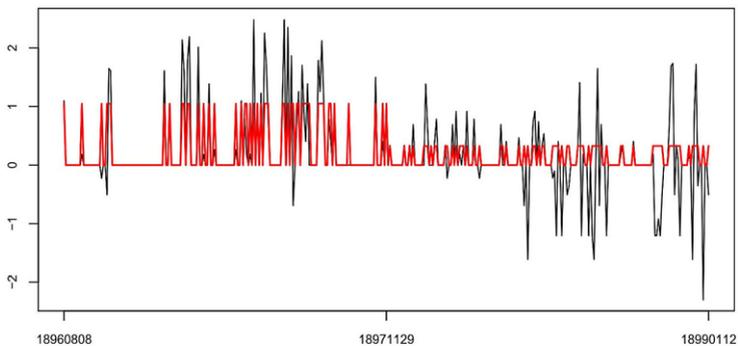


Рис. 4. Преобразование по Боксу-Коксу (IBC) суточных осадков. Точка 1 – изменение однородности 1886.11.09 (м.с. Архангельск)

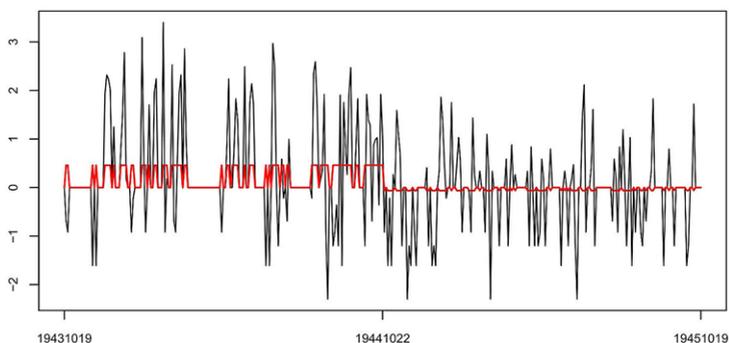


Рис. 5. Преобразование по Боксу-Коксу (IBC) суточных осадков. Точка 2 – изменение однородности 1911.11.11 (м.с. Архангельск)

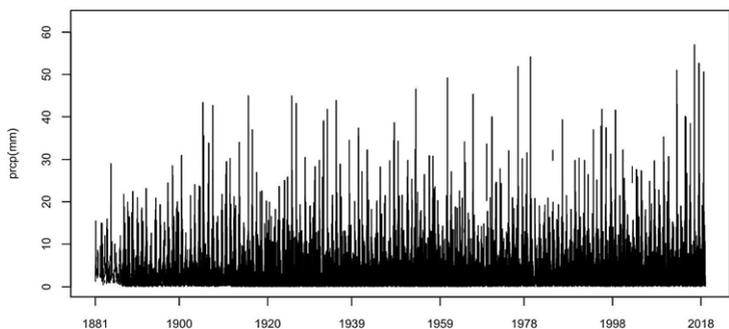


Рис. 6. Оригинальная серия суточных осадков за весь период (м.с. Архангельск)

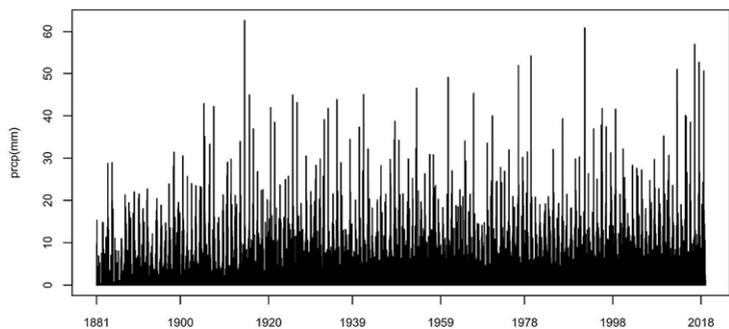


Рис. 7. Суточные осадки, скорректированные по QM за весь период (м.с. Архангельск)

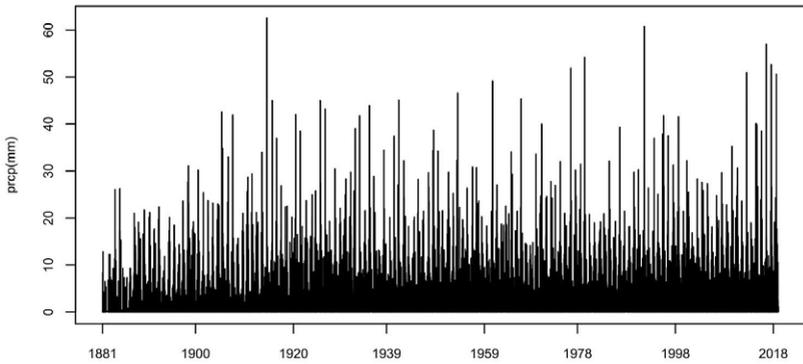


Рис. 8. Суточные осадки, скорректированные по ИВС за весь период (м.с. Архангельск)

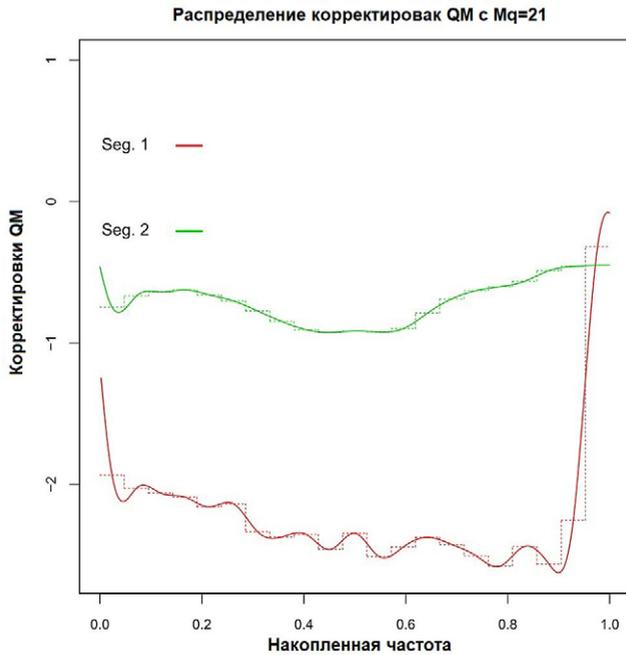


Рис. 9. Распределение поправок QM при $M_q = 21$ (м.с. Архангельск)

Заключение

Сложность при получении однородных рядов суточных осадков заключается в том, что они выпадают фрагментарно, локально и не стабильны во времени и пространстве. Поэтому при исследованиях невозможно применять корреляционные методы, используя данные соседних станций. Несмотря на это, с помощью программного пакета Rhtests_dlyPrsr удалось получить однородные ряды суточных осадков по метеостанциям России. Процесс гомогенизации суточных осадков позволил выявить даты нарушения их однородности. Эта методология может быть применима и в других областях исследования, например при анализе прошлых событий, связанных с погодой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuya E.K., Gjeltten H.M., Tveito O.E.* Homogenization of Norwegian monthly precipitation series for the period 1961–2018 // *Adv. Sci. Res.* 2022. V. 19. P 73–80. URL: <https://doi.org/10.5194/asr-19-73-2022>. (дата обращения: 08.08.2022).
2. *Qiang Zhang, Xihui Gu, Vijay P. Singh, Chong-Yu Xu, Dongdong Kong, Mingzhong Xiao, Xiaohong Chen.* Homogenization of precipitation and flow regimes across China: Changing properties, causes and implications // *J. of Hydrology.* 2015. V. 530. P 462–475. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415007246?via%3Dihub> (дата обращения: 05.08.2022).
3. ВНИИГМИ-МЦД // URL: <http://meteo.ru> (дата обращения: 05.08.2022).
4. *Разуваев В.Н.* Из истории климатических исследований в ВНИИГМИ-МЦД // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2014. Вып. 177. С. 28–69.
5. *Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н.* Специализированные массивы данных для климатических исследований // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2014. Вып. 177. С. 136–148.
6. *Финаев А.Ф., Разуваев В.Н.* Гомогенизация данных среднемесячных осадков по метеорологическим станциям России // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2023. Вып. 191. С. 34–44.
7. *Финаев А.Ф., Разуваев В.Н.* Гомогенизация суточных данных температуры воздуха // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2021. Вып. 189. С. 233–247.
8. *Финаев А.Ф., Разуваев В.Н.* Гомогенизация климатических рядов на примере среднемесячной температуры воздуха // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 2020. Вып. 186. С. 57–68.

9. WMO Commission for Climatology // URL: www.climatol.eu/tt-hom (дата обращения: 12.05.2022).

10. Wang X.L., Feng Y. RHtestsV4 User Manual // Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada. 29 p. URL: http://etccdi.pacificclimate.org/RHtest/RHtestsV4_UserManual_10Dec2014.pdf (дата обращения: 17.02.2021).

11. Wang X.L., Chen H., Wu Y., Feng Y., Pu Q. New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2010. V. 49, N 12. P. 2416–2436. DOI: 10.1175/2010JAMC2376.1. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/49/12/2010jamc2376.1.xml#container-55935-item-55934> (дата обращения: 21.04.2023).

12. Wang X.L. Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2008a. 47. P. 2423–2444. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/47/9/2008jamc1741.1.xml> (дата обращения: 21.04.2023).

13. Wang X.L. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend-change // J. Atmos. Oceanic Tech. 2008b. V. 25, N 3. P. 368–384. DOI:10.1175/2007/JTECHA982.1. URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2010/EGU2010-2964.pdf> (дата обращения: 21.04.2023).

УДК 551.521.11:551.583.1

КЛИМАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Л.К. Клещенко

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
lkk.obninsk@yandex.ru*

Введение

Из всех возможных статистических характеристик климатического режима основной является среднее многолетнее значение, которое может рассчитываться за периоды различной продолжительности. Для описания современного климата Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в конце 20-го столетия был рекомендован 30-летний период – 1961–1990 гг. Рассчитанные для этого периода средние значения метеорологических параметров получили название «норм», а отклонения от среднего – название «аномалий». После завершения последнего десятилетия 20-го столетия рекомендаций ВМО об изменении базового периода для расчёта норм не последовало. В ряде стран в качестве базового периода стал использоваться сначала период 1971–2000 гг., а затем и 1981–2010 гг. В результате, например, в региональном Бюллетене ВМО [1] можно увидеть аномалии климатических переменных, рассчитанные для различных территорий относительно разных базовых периодов.

В 2021 г. ВМО было принято решение о расчёте новых норм, относящихся к периоду 1991–2020 гг. В ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» такие нормы были рассчитаны для восьми основных метеорологических параметров, в том числе для продолжительности солнечного сияния (ПСС). Для расчётов использовалась накопленная в Едином государственном фонде данных о состоянии окружающей среды (ЕГФД) информация месячного разрешения (ТМСМ) по сети станций Росгидромета, которая содержится в режимно-справочном банке данных «Метеорология». Необходимым условием для

расчёта новых норм являлось наличие информации в базовом периоде на станции не менее чем за 24 года. Таблицы с новыми нормами ПСС были переданы в ВМО (для 172 станций) и в территориальные управления Гидрометеорологической службы РФ (для 503 станций). Дополнительно были рассчитаны средние многолетние значения ПСС для других периодов, что позволило получить некоторые оценки динамики климатического режима солнечного сияния на территории России в конце XX – начале XXI веков.

Новые нормы продолжительности солнечного сияния

Распределение новых норм для месячных сумм ПСС на территории Российской Федерации показано на рис. 1, а в табл. 1 приводятся их средние значения для квазиоднородных физико-географических регионов России, которые используются в Бюллетене мониторинга приземного климата в отделе климатологии ВНИИГМИ-МЦД [2].

Таблица 1

Средняя многолетняя суммарная за месяц продолжительность солнечного сияния (часы), осреднённая по регионам РФ (1991–2020 гг.)

Регион	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Север ЕЧР и Зап. Сибири	9	48	124	193	228	261	293	182	101	54	15	2
Север Вост. Сиб. и Якутии	7	70	210	287	291	288	282	203	121	81	24	2
Чукотка и север Камчатки	27	89	198	236	238	248	246	176	125	95	38	14
Центр ЕЧР	54	82	129	191	272	288	279	235	157	85	34	28
Центр и юг Зап. Сибири	59	107	170	219	263	286	297	224	157	91	56	42
Центр и юг Вост. Сибири	81	131	201	230	256	288	266	226	170	131	84	59
Дальний Восток	107	135	194	184	192	195	172	175	171	145	110	87
Алтай и Саяны	95	127	183	217	244	265	252	232	189	137	92	79
Юг ЕЧР	100	95	133	176	231	261	282	261	209	156	98	75
РФ	67	103	165	208	250	270	264	219	161	108	63	47

Следует отметить, что существуют другие, полученные ранее, средние многолетние значения ПСС для метеорологических станций РФ. Так, средние месячные суммы приводятся в научно-прикладном справочнике: для 203 станций – за период 1961–1990

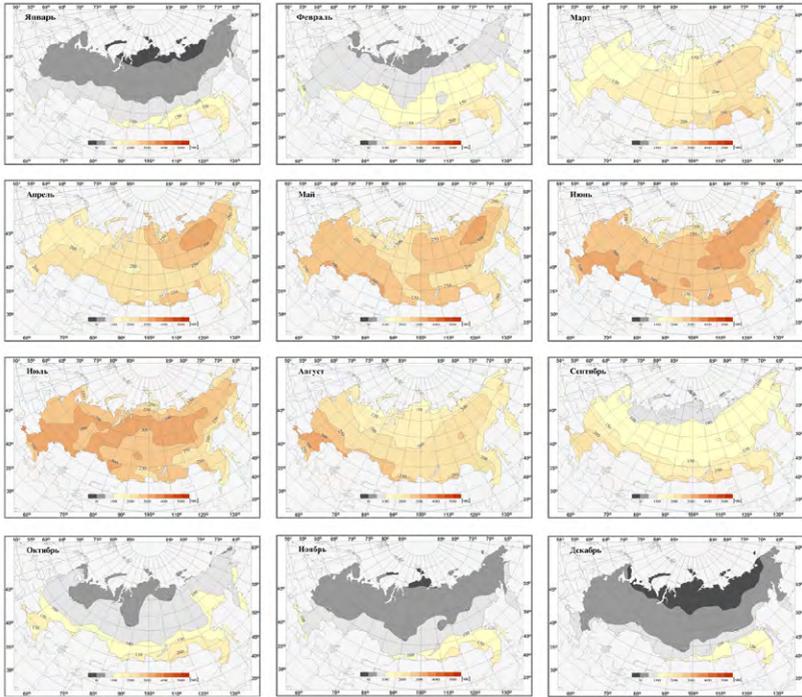


Рис. 1. Средняя многолетняя суммарная за месяц продолжительность солнечного сияния на территории РФ (1991–2020 гг.)

и для 210 станций – за 1971–2000 гг. [3]. В системе климатического мониторинга ПСС [4] используются средние значения (нормы) за период 1981–2010 гг. Они получены для 315 метеорологических станций, передающих в оперативном режиме сводки КЛИМАТ. Карты, на которых представлено их географическое распределение, помещены в [5] для месячных сумм ПСС и в [6] – для сезонных. При обработке данных для Годового доклада Росгидромета за 2022 год будет осуществлён переход к новым нормам, рассчитанным за период 1991–2020 гг.

Как видно из табл. 1, наиболее солнечным для России в целом является июнь – средняя продолжительность солнечного сияния в этом месяце составляет 270 часов. Немногоим уступает

ему июль (264 часа), поскольку в ряде регионов именно на этот месяц приходится максимум в годовом ходе. Наименьшая суммарная за месяц продолжительность солнечного сияния во всех регионах наблюдается в декабре. Годовой ход хорошо выражен во всех регионах, в наименьшей степени – в регионе Дальний Восток, где амплитуда годового хода составляет всего 108 часов, тогда как наибольшая достигает 291 часа в регионе Север ЕЧР и Западной Сибири (ЕЧР – европейская часть России).

Географическое распределение новых норм сезонной продолжительности солнечного сияния на территории РФ показано на рис. 2, годовой – на рис. 3. Соответственно, в табл. 2 приводятся средние региональные значения этих норм. Наибольшая средняя многолетняя суммарная за год ПСС на территории РФ наблюдается в Забайкалье и составляет 2900 часов, тогда как на севере страны значения в три раза меньше (менее 950 часов).

Таблица 2

Средняя многолетняя суммарная за сезон/год продолжительность солнечного сияния (часы), осреднённая по регионам РФ (1991–2020 гг.)

Регион	Сезон				Год
	Зима	Весна	Лето	Осень	
Север ЕЧР и Западной Сибири	57	536	699	157	1449
Север Вост. Сибири и Якутии	95	759	776	218	1848
Чукотка и север Камчатки	141	627	694	253	1715
Центр ЕЧР	148	619	840	279	1886
Центр и юг Западной Сибири	208	671	829	295	2003
Центр и юг Восточной Сибири	289	720	786	375	2169
Дальний Восток	338	576	541	415	1870
Алтай и Саяны	310	672	742	406	2131
Юг ЕЧР	255	565	839	475	2134
РФ	216	638	765	326	1946

В табл. 3 приведены пространственные статистики, рассчитанные по совокупности станций, использовавшихся для построения карт новых норм. Аналогичные статистики получены также для полей «старых» норм, рассчитанных за периоды 1961–1990 и 1981–2010 гг.

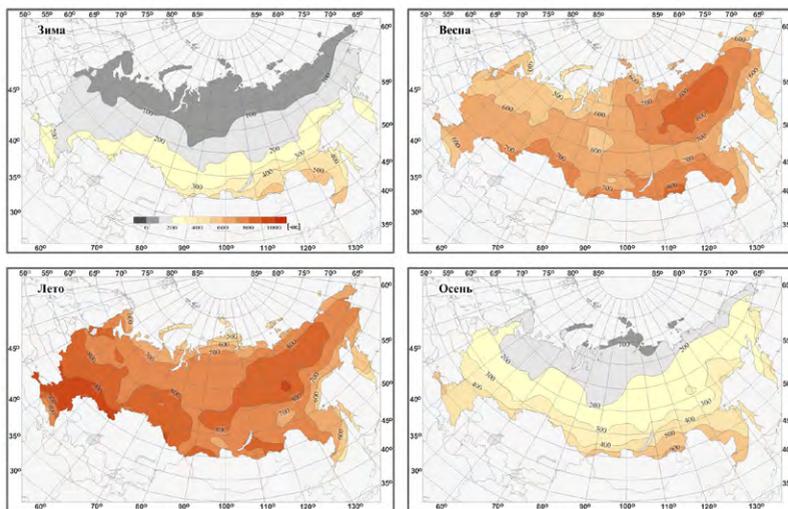


Рис. 2. Средняя многолетняя суммарная за сезон продолжительность солнечного сияния на территории РФ (1991–2020 гг.)

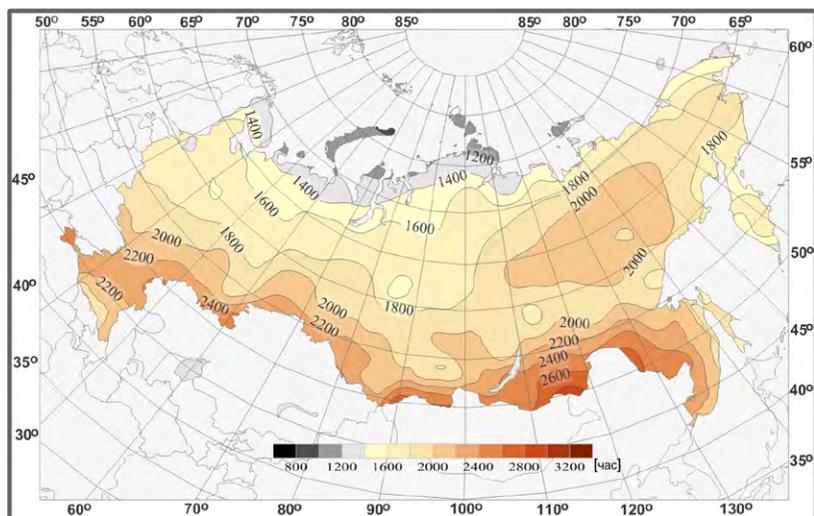


Рис. 3. Средняя многолетняя суммарная за год продолжительность солнечного сияния на территории РФ за период 1991–2020 гг.

Таблица 3

Оценки пространственных статистик полей средней многолетней продолжительности солнечного сияния на территории РФ (часы)

Временное разрешение		1961–1990			1981–2010			1991–2020		
		MEAN	MIN	MAX	MEAN	MIN	MAX	MEAN	MIN	MAX
Месяц	Январь	64	0	188	62	0	188	65	0	194
	Февраль	104	4	208	104	1	210	105	0	213
	Март	167	83	265	171	78	271	172	70	277
	Апрель	207	113	307	211	114	327	213	112	334
	Май	249	76	336	250	89	335	253	90	329
	Июнь	267	74	359	268	71	348	272	71	360
	Июль	265	62	353	270	65	349	272	63	358
	Август	218	85	327	219	80	322	222	72	333
	Сентябрь	157	44	261	153	29	261	157	25	260
	Октябрь	107	14	227	106	8	225	105	3	227
	Ноябрь	64	0	184	65	0	189	64	0	192
	Декабрь	46	0	179	47	0	171	47	0	174
Сезон	Зима	215	4	561	212	1	560	216	0	570
	Весна	623	314	860	631	319	900	638	322	905
	Лето	750	222	1006	757	219	988	765	215	1026
	Осень	328	58	635	324	38	657	326	31	661
Год		1916	988	2852	1924	976	2879	1946	922	2901

Примечание: **MEAN** – средневзвешенное значение; **MIN** – минимальное значение; **MAX** – максимальное значение.

Оценки современных изменений климатического режима ПСС

Сопоставление норм за различные периоды является одним из способов, позволяющим проследить за изменением климатического режима. В настоящей работе были рассчитаны разности средних многолетних сумм ПСС (месячных, сезонных, годовых) между последовательными 30-летними периодами 1991–2020 и 1961–1990 гг. Оценки полученных разностей для сезонных норм представлены на рис. 4, для годовых – на рис. 5.

На этих рисунках видно, что во все сезоны наблюдаются как положительные, так и отрицательные изменения норм. На отдельных станциях эти изменения весьма существенны и требуют специального анализа.

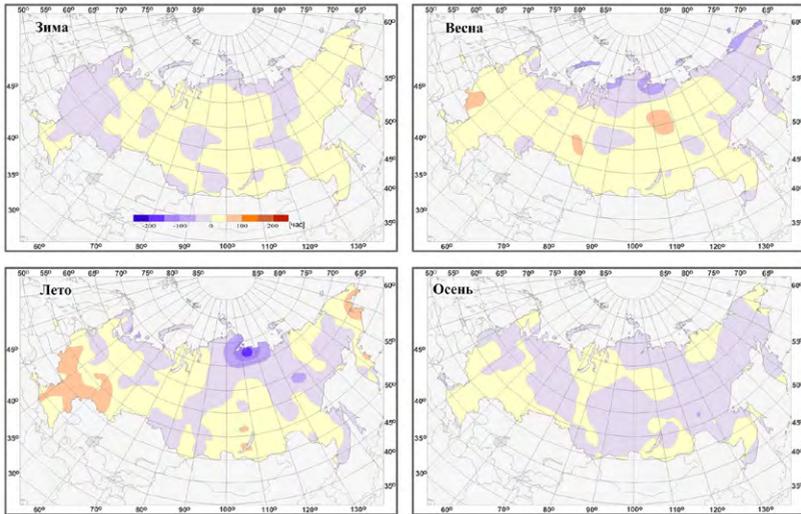


Рис. 4. Различия между средней сезонной продолжительностью солнечного сияния на территории РФ для 30-летних периодов 1991–2020 и 1961–1990 гг.

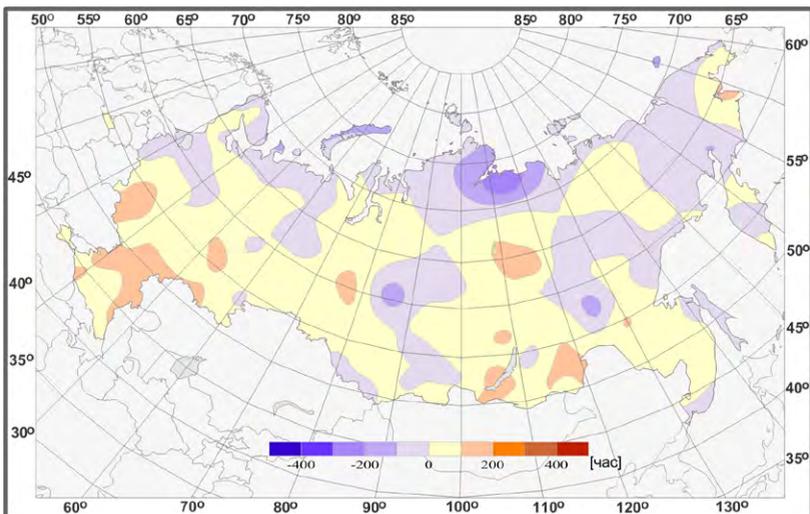


Рис. 5. Различия между средней годовой продолжительностью солнечного сияния на территории РФ для 30-летних периодов 1991–2020 и 1961–1990 гг.

В табл. 4 приводятся разности норм, осреднённые по квазиоднородным физико-географическим районам РФ. Полученные оценки свидетельствуют о некотором росте годовых сумм ПСС в среднем для территории РФ. По сравнению с периодом 1961–1990 гг. средняя для РФ годовая сумма ПСС увеличилась на 29 часов (1,5 %). Наиболее значительные положительные изменения годовых сумм ПСС произошли на юге ЕЧР и составили 65 часов. Увеличение ПСС наблюдается также в Центре ЕЧР (на 48 часов) и в регионе Центр и юг Восточной Сибири (на 50 часов).

Таблица 4

Осреднённые по квазиоднородным физико-географическим районам РФ различия между средней многолетней продолжительностью солнечного сияния для 30-летних периодов 1991–2020 и 1961–1990 гг. (часы)

Регион	Число станций	Сезон				Год
		Зима	Весна	Лето	Осень	
Север ЕЧР и Западной Сибири	43	1	-5	-5	0	-9
Север Вост. Сибири и Якутии	20	12	-2	-13	-8	-12
Чукотка и север Камчатки	7	1	-29	14	-11	-25
Центр ЕЧР	94	-11	21	33	5	48
Центр и юг Западной Сибири	49	4	22	1	-6	21
Центр и юг Восточной Сибири	67	13	22	22	-6	50
Дальний Восток	45	3	3	-2	-6	-3
Алтай и Саяны	29	4	20	13	-4	33
Юг ЕЧР	27	7	22	34	2	65
РФ	381	2	15	15	-2	29

Основной вклад в рост годовых сумм ПСС внёс весенне-летний период, причём отличительной особенностью весеннего сезона является наибольшее пространственное распространение положительных разностей норм. Уменьшение годовых сумм ПСС хорошо выражено в трёх северных регионах. Наибольшее из них (-25 часов) отмечается в регионе Чукотка и север Камчатки, обусловлено оно уменьшением ПСС в переходные сезоны (весна, осень). В то же время уменьшение ПСС на севере Восточной Сибири происходило главным образом в летний сезон. Из других наиболее существенных изменений в многолетних средних сезонных

региональных суммах ПСС можно отметить наблюдавшийся в зимний сезон рост ПСС в Восточной Сибири и её уменьшение в Центре ЕЧР. В осенний сезон в большинстве регионов произошло уменьшение ПСС.

Для выяснения структуры изменений климатического режима солнечного сияния на территории РФ были рассчитаны средние многолетние значения ПСС (сезонные и годовые) на станциях для шести последовательных десятилетий, начиная с 1961 года, получены оценки разностей между соседними десятилетиями и проведено их пространственное осреднение. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Осреднённые по территории РФ различия средней многолетней продолжительности солнечного сияния для последовательных 10-летних периодов: 1961–1970 (1), 1971–1980 (2), 1981–1990 (3), 1991–2000 (4), 2001–2010 (5), 2011–2020 (6)

Сезон	D{p2-p1}	D{p3-p2}	D{p4-p3}	D{p5-p4}	D{p6-p5}
Зима	-6	-4	-7	19	1
Весна	-8	7	3	8	9
Лето	-2	-7	11	7	3
Осень	-4	-9	3	3	2
Год	-21	-14	10	37	15

Как видно из табл. 5, в начале рассматриваемого периода (70-е годы прошлого столетия) в среднем для РФ во все сезоны отмечалось уменьшение ПСС. А далее начинается её рост: в 80-е годы – в весенний сезон, в 90-е годы к нему добавляется увеличение ПСС в летний сезон (основное) и небольшой рост в осенний сезон. В начале нынешнего 21-го столетия наблюдается увеличение зимних сумм ПСС, которое является наибольшим из всех приведённых в таблице сезонных изменений (+19 часов за десятилетие) и определяющим для роста годовых сумм. В последнее рассматриваемое десятилетие (2011–2020 гг.) тенденция к увеличению ПСС во все сезоны сохраняется, но для весны является наиболее выраженной.

Что касается годовых сумм ПСС, то в период до 1980-х годов в среднем для территории РФ происходило уменьшение ПСС.

Затем в последнее десятилетие прошлого века начался её рост (при этом основной вклад внёс летний сезон), и в первом десятилетии нынешнего столетия был достигнут уровень 1960-х годов (за счёт резкого роста ПСС зимнего сезона). Эти особенности хорошо видны на рис. 6, где показаны многолетние изменения средней для территории РФ годовой суммы ПСС и её средние значения для каждого 10-летнего периода.

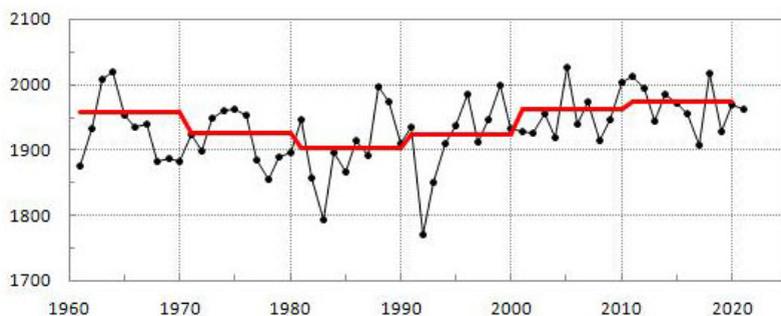


Рис. 6. Временной ряд суммарной за год продолжительности солнечного сияния, осреднённой по территории РФ, и её 10-летние средние значения

Тренд годовой суммы ПСС для территории РФ в целом в первое 30-летие (1961–1990 гг.) был отрицательным, составил -9 ч/10 лет и являлся статистически не значимым (на 5 %-ном уровне). Вклад линейного тренда в суммарную дисперсию ряда D составил всего 3 %. Во втором 30-летии (1991–2020 гг.) тренд поменял знак, стал положительным ($+27$ ч/10 лет, $D = 22$ %) и является статистически значимым. Следует отметить, что при рассмотрении линейного тренда для скользящих 30-летий (с шагом пять лет) наибольший тренд ПСС оказался в 30-летие 1981–2010 гг. и составил $+31$ ч/10 лет ($D = 24$ %).

Заключение

Рассчитаны новые нормы месячных, сезонных и годовых сумм ПСС на метеорологических станциях РФ – 30-летние средние за период 1991–2020 гг. Представлено их пространственное

распределение и получены средние значения для квазиоднородных физико-географических районов РФ.

В целях изучения динамики климатического режима проведено сопоставление ПСС для 30-летних периодов 1961–1990 и 1991–2020 гг. В первом 30-летию в среднем для территории РФ происходило уменьшение ПСС (линейный тренд составил -9 ч/10 лет), во втором – увеличение ($+27$ ч/10 лет). По сравнению с первым 30-летию средняя суммарная годовая продолжительность солнечного сияния увеличилась на 29 часов. Основной вклад в это увеличение внесли весенний и летний сезоны. Наиболее значительный рост ПСС ($+65$ часов) произошёл на юге ЕЧР. В то же время в северных регионах страны наблюдается уменьшение годовых сумм ПСС.

На основе анализа средних сезонных сумм ПСС для последовательных 10-летних периодов выявлены основные особенности структуры их многолетних изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Annual Bulletin on the Climate in WMO Region VI – Europe and Middle East – 2019.* <https://www.dwd.de/EN/ourservices/ravibulletinjahr/ravibulletinjahr.html>. Последнее обращение: 26.01.2023.
2. *Климатические условия на территории России.* <http://meteo.ru/climate/93-klimaticheskie-usloviya/179-klimaticheskie-usloviya-na-territorii-rossii>. Последнее обращение: 26.01.2023.
3. *Научно-прикладной справочник: «Климат России-2018».* ВНИИГМИ-МЦД. <http://meteo.ru/climate/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-klimat-rossii>. Последнее обращение: 26.01.2023.
4. *Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год.* М.: Росгидромет, 2022. С. 57–61.
5. *Клещенко Л.К.* Региональные особенности режима солнечного сияния на территории России в 2019 году // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2020. Вып. 186. С. 101–117.
6. *Клещенко Л.К.* Некоторые результаты статистического анализа данных о продолжительности солнечного сияния на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2018. Вып. 181. С. 69–85.

УДК 551.501.771

ХАРАКТЕРИСТИКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА АЗИАТСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ЗА ПЕРИОД 1966–2021 ГГ.

В.Н. Кузнецова¹, Н.В. Швець²

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
¹ kuznezova@meteo.ru, ² schvets@meteo.ru*

Введение

Климатические пояса России – уникальное явление. Ни одна другая страна не может похвастаться подобным разбросом климатических условий. Этому феномену способствует огромная территория, неоднородность расположения водоёмов, перепады высот и широкое разнообразие рельефа: от высочайших кавказских хребтов до равнин, лежащих ниже уровня моря, а также влияние Арктики, Атлантического и Тихого океанов на воздушные массы.

Карта климатических поясов России включает 5 основных типов с севера на юг: арктический, субарктический, умеренный, муссонный и субтропический [1]. Почти вся европейская территория России (ЕТР) и небольшая часть азиатской территории России (АТР) и лежит в поясе климата умеренных широт. При этом значительная часть азиатской территории России относится к арктическому и субарктическому климатическим поясам. Лишь небольшая территория Кавказа и Крыма относятся к субтропическому климатическому поясу, к муссонному климатическому поясу – побережье Дальнего Востока. Ввиду значительности площадей, относящихся к каждому поясу, и разнообразия климатических условий в пределах этих площадей каждый тип климата делится на несколько подтипов с устоявшимся температурным и влажностным режимом и имеющим общие закономерности в условиях радиационного режима и атмосферной циркуляции.

Выбор средств классификации климата и районирования проводится в соответствии с современным состоянием науки,

наличием информации и развитием системы наблюдений в зависимости от решения практических задач и возможностей. Удачное районирование при глобальных климатологических исследованиях, особенно при осреднении, позволяет выделить оптимальные районы, имеющие общие черты климата. Нами за основу районирования была взята получившая наибольшее признание на территории России классификация Алисова, учитывающая особенности радиационного режима и циркуляции атмосферы, в сочетании с районированием А.А. Каминского [2] по дневной относительной влажности воздуха с учётом типа подстилающей поверхности.

Предметом данного исследования является относительная влажность воздуха (f), представляющая собой отношение фактической упругости водяного пара (e) к максимальной упругости водяного пара (E) (насыщающей упругости) при той же температуре воздуха, выраженное в процентах (%). Может принимать значения от 0 до 100 %.

$$f = e/E.$$

Проведённые нами ранее исследования изменения относительной влажности воздуха по подтипам климата или так называемым климатическим районам Алисова [3, 4] показали зависимость её в большей степени от типа подстилающей поверхности в сочетании с природно-климатическими зонами. В результате проведённого анализа были выявлены районы на азиатской территории России, имеющие одинаковые тенденции в изменении относительной влажности воздуха, и они, как правило, расположены в сходных природно-климатических и циркуляционных условиях и одинаковых типах подстилающей поверхности, что позволило их объединить и провести оптимальное районирование по типам подстилающей поверхности для исследования относительной влажности воздуха. Такие районы обнаружены только на азиатской территории России.

Целью настоящей работы является продолжение анализа изменения среднемесячной относительной влажности воздуха по этим районам [4] на азиатской территории России по основным природно-климатическим зонам для центральных месяцев

сезонов, поскольку ввиду запаздывания годового хода относительной влажности из-за широты местности центральный месяц сезона более точно характеризует возможные изменения метеорологического элемента в сезоне.

Расчёты для АТР проводились по 7 основным районам, (горные районы не учитывались – они требуют отдельного анализа) [5]: 1 – муссонный арктический (МА); 2 – район льдов и ледяной тундры (ЛТ); 3 – субарктический (СА): север Восточной Сибири и центр Восточной Сибири; 4 – тайга (сюда относятся широколиственные и смешанные леса) (Т); 5 – лесостепи и степи (ЛСС); 6 – юг Восточной Сибири (ЮВС): Предбайкалье, Забайкалье и Бурятия; 7 – муссонный тихоокеанский (МТ) [4].

Карта-схема районов представлена на рис. 1.

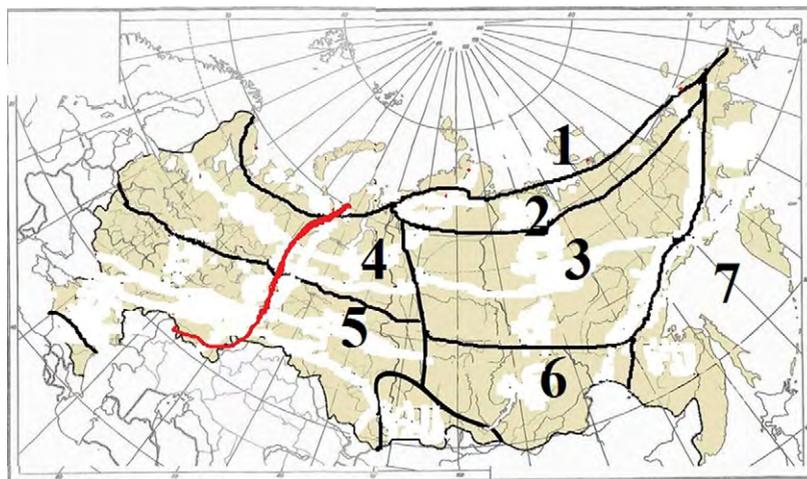


Рис. 1. Карта-схема основных природно-климатических районов азиатской территории России для исследования относительной влажности воздуха: 1 – муссонный арктический; 2 – район льдов и ледяной тундры; 3 – субарктический; 4 – тайга; 5 – лесостепи и степи; 6 – юг Восточной Сибири; 7 – муссонный тихоокеанский.

Выбор станций внутри района осуществлялся по той же методике, что и в [3], по типу годового хода. Выбирались станции, имеющие типичный для каждого района одинаковый годовой ход относительной влажности воздуха.

Данные и методы

Для исследования изменения режима влажности исходным материалом послужил базовый массив относительной влажности воздуха, представляющий собой постанционные ряды среднемесячных значений относительной влажности воздуха 572 однородных длиннорядных станций России, имеющих ряды наблюдений с 1966 по 2021 год. Из массива были выбраны 372 станции, равномерно расположенные на азиатской территории России. Вся информация проконтролирована [7] и соответствует требованиям, предъявляемым к данным в задачах исследования изменения климата. Базовый массив был дополнен ввиду редкой сети северными станциями, входящими в арктический и субарктический пояс и относящимися к району Арктики, исследованию которого уделяется в настоящее время особое внимание. Добавленные станции позволили выделить для анализа дополнительный отдельный район – это район льдов и ледяной тундры (ЛТ), находящийся у семидесятой параллели на азиатской территории России. Данный район имеет особенный годовой ход относительной влажности воздуха с двумя максимальными значениями относительной влажности – весной и осенью, которые связаны со стабильно низкими температурами арктического климатического пояса. В сочетании с осадками выделенный район в переходные сезоны сопровождается излишней влажностью.

Оценка изменения влажности воздуха получена на основе анализа линейных трендов, характеризующих среднюю скорость изменения исследуемой величины.

Исследование изменения влажности проводилось путём эмпирико-статистического анализа временных рядов среднемесячной относительной влажности воздуха. Расчёт статистических характеристик и коэффициентов линейного тренда проводился на основе специально разработанного авторского пакета программ и программы «Excel». Тренды рассчитывались по уравнению линейной регрессии [6]: значимость коэффициентов линейного тренда оценивалась по критерию Стьюдента [6]. Для исключения влияния годового хода в исследованиях изменения влажности использовались не сами среднемесячные значения, а их аномалии (Δf).

Для расчёта аномалий (отклонений наблюденных значений от нормы) в качестве нормы использовались обновлённые нормы за период 1981–2010 гг., поскольку, как отмечено в [7], нормы за три последних тридцатилетия изменились и больше подходят для оперативной оценки аномальности текущей погоды и целей мониторинга климата последних десятилетий.

Результаты

По временным рядам пространственно-осреднённых аномалий относительной влажности воздуха (Δf) были рассчитаны тренды влажности воздуха (% /10 лет) за период с 1966 по 2021 год, для центральных месяцев сезонов и за год в целом, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты линейных трендов аномалий среднемесячной относительной влажности воздуха (Δf), осреднённых по квазиоднородным климатическим районам АТР за период 1966–2021 гг. (% /10 лет) для центральных месяцев сезонов и за год в целом (* помечены тренды, значимые при заданном 5 %-ном уровне значимости)

Районы	Январь	Апрель	Июль	Октябрь	Год
1	-0,2 *	0,2	-0,3 *	0,3*	0,0
2	-0,1	-0,1	-0,3*	0,4*	-0,2
3	0,2*	0,1	0,6*	0,6*	0,2
4	0,2*	-0,2*	-0,1	0,4*	0,1
5	0,0	-1,1*	-0,4*	-0,5*	-0,3*
6	0,2*	-0,2*	-0,1	0,3*	0,0
7	-0,2*	-0,1	-0,1	-0,2	0,0

Примечание: красным цветом выделены положительные значения коэффициента линейного тренда.

При оценке тренда важно также получить оценку его значимости, т. е. установить, насколько существенен его вклад в изменчивость случайного процесса. В данной работе рассчитанный критерий Стьюдента сравнивался с его критическим значением на 5 %-ном уровне значимости.

На рис. 2–5 представлены распределения линейных трендов (прямая чёрная линия) и временные ряды осреднённых аномалий

относительной влажности воздуха (синяя линия) для центральных месяцев сезонов для районов основных природно-климатических зон азиатской части России.

В январе на большей части континентальной азиатской территории России (районы 3, 4, 5, 6) прослеживается небольшое увеличение аномалий среднемесячных значений относительной влажности воздуха – линейные тренды положительны. Возможно это связано с повышением зимней температуры [8, 9] и увеличением количества оттепелей [10], эти факторы приводят к увеличению концентрации водяного пара в воздухе. Уменьшение влажности отмечается лишь в прибрежных районах с муссонным характером погоды – на арктических прибрежных территориях АТР (районы 1, 2) и на тихоокеанском побережье (район 7).

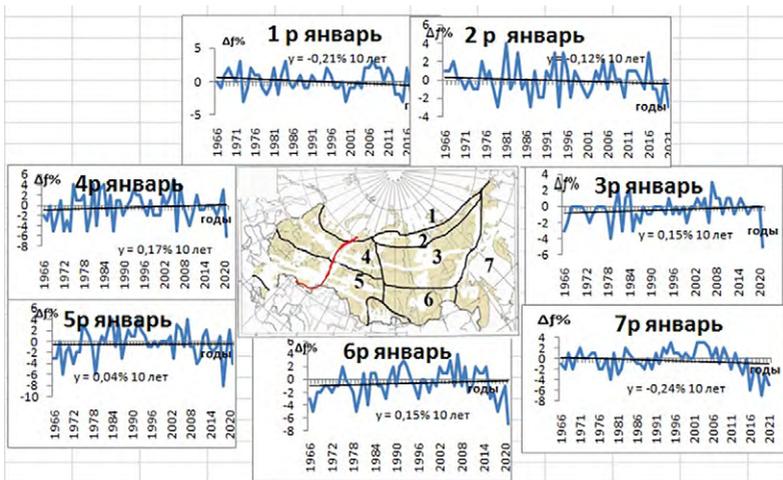


Рис. 2. Тренды (%/10 лет) и временные ряды аномалий осреднённой по территории квазиоднородных климатических районов на азиатской территории России январской относительной влажности воздуха за период с 1966 по 2021 год.

Обозначения: 1 – муссонный арктический(МТ) район ; 2 – район льдов и ледяной тундры (ЛТ); 3 – субарктический(СА) район (север Восточной Сибири и центр Восточной Сибири); 4 – тайга (сюда относятся широколиственные и смешанные леса) (Т); 5 – лесостепи и степи (ЛСС); 6 – юг Восточной Сибири (ЮВС): Предбайкалье, Забайкалье и Бурятия; 7 – муссонный тихоокеанский (МТ) район [4].

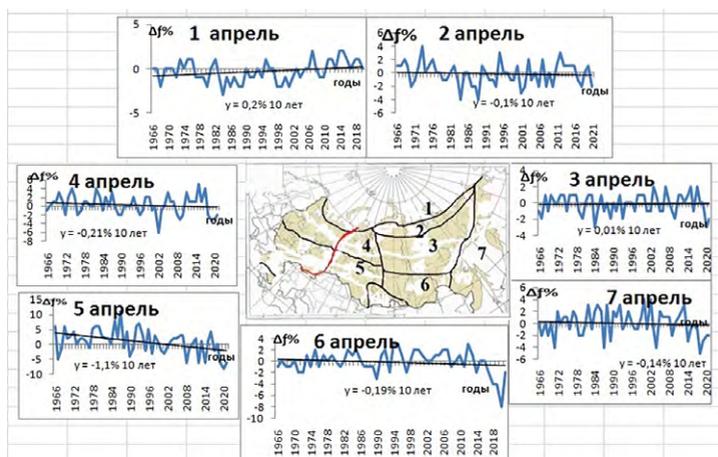


Рис. 3. Тренды (%/10 лет) и временные ряды аномалий осреднённой по территории квазиоднородных климатических районов на азиатской территории России апрельской относительной влажности воздуха за период с 1966 по 2021 год. Обозначения те же, что и на рис. 2.

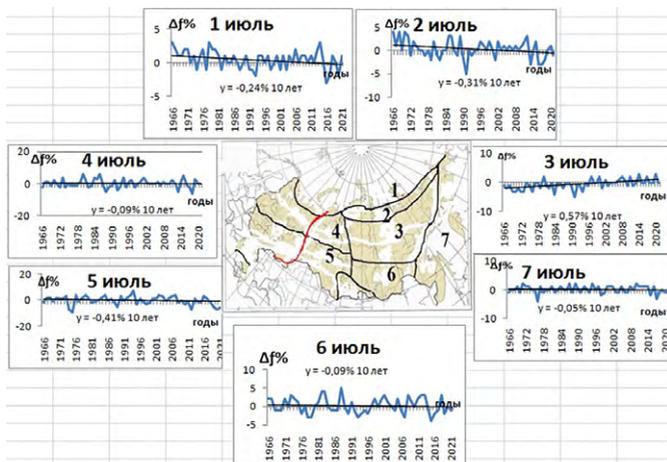


Рис. 4. Тренды (%/10 лет) и временные ряды аномалий осреднённой по территории квазиоднородных климатических районов на азиатской территории России июльской относительной влажности воздуха за период с 1966 по 2021 год. Обозначения те же, что и на рис. 2.

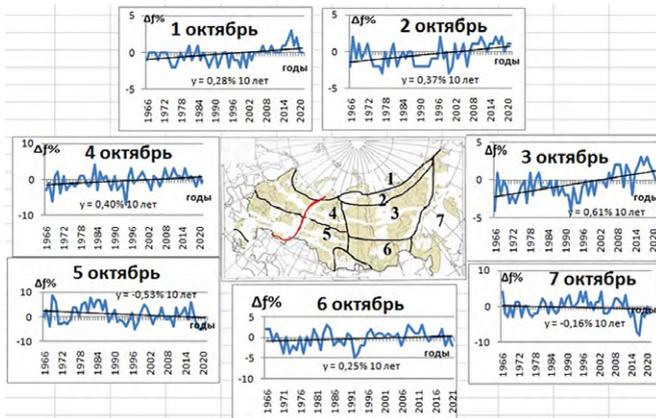


Рис. 5. Тренды (%/10 лет) и временные ряды аномалий осреднённой по территории квазиоднородных климатических районов на азиатской территории России октябрьской относительной влажности воздуха за период с 1966 по 2021 год. Обозначения те же, что и на рис. 2.

В апреле (табл. 1 и рис. 3) наблюдается противоположная картина: почти на всей азиатской территории России наблюдается уменьшение относительной влажности воздуха. Здесь статистически значимый коэффициент линейного тренда составляет от $-0,2\%/10$ лет на севере АТР (район 2) до $-1,1\%/10$ лет – в лесостепных и степных районах АТР (5 район), что связано с резким повышением температуры воздуха в апреле и малым содержанием водяного пара после зимнего вымораживания [8]. Увеличение относительной влажности воздуха отмечается лишь на побережье и островах Северного Ледовитого океана (район 1 – значимый тренд составляет $+0,2\%/10$ лет) и субарктических районах Сибири (район 3), но здесь он статистически незначим.

Похожая картина наблюдается в июле – уменьшение влажности наблюдается на большей части АТР: тренды составляют от $-0,4$ до $-0,1\%/10$ лет, хотя они не везде значимы. Лишь в районе субарктики (район 3) отмечается рост влажности – значимый тренд здесь составляет $+0,6\%/10$ лет.

В октябре наблюдается противоположная лету картина – увеличение влажности наблюдается по всей АТР (значимые

тренды – 0,3–0,6 %/10 лет). Уменьшение влажности отмечается лишь в степном и лесостепном районах АТР (район 5) и на тихоокеанском побережье (район 7).

Годовые изменения влажности (табл. 1) незначительны – тренды малы и незначимы. Исключение составляет лишь район лесостепей и степей (район 5), в котором наблюдается уменьшение влажности – здесь значимый тренд -0,3 %/10 лет.

Помимо анализа трендов за период 1966–2021 гг., представляет интерес исследование изменения влажности за последние десятилетия по другим критериям.

В качестве меры интенсивности происходящих изменений относительной влажности воздуха последних десятилетий использовались разности (Δ) средних месячных значений относительной влажности по районам за два одинаковых сравниваемых периода – 1П – 1966–1993 гг. и 2П – 1994–2021 гг. (табл. 2).

Анализ изменений разностей среднемесячных значений относительной влажности воздуха по месяцам (табл. 2) между приведёнными выше периодами показывает, что зимой (декабрь, январь, февраль) влажность сильнее растёт за последний период (1994–2021 гг.): почти во всех районах разница $-\Delta$ – положительная, лишь в районе степей и лесостепей (район 5) и тихоокеанского побережья (район 7) она отрицательная. Весной разница по районам и месяцам разнородна; уменьшение влажности (Δ) за последний период по всем весенним месяцам отмечено в районах тайги, степей и лесостепей АТР (районы 4 и 5), увеличение – в северной и восточной части АТР (районы 1–3, 7); летом разница разнонаправлена в большинстве районов, кроме района 1 – здесь наблюдается уменьшение среднемесячных значений относительной влажности за последний период; и районов 3 и 7, где, наоборот, наблюдается увеличение влажности.

Осенью выделяется большая часть территории АТР – это районы 2, 3, 4, 6, где за последние десятилетия наблюдается увеличение среднемесячных значений относительной влажности, кроме района степей и лесостепей (район 5), здесь во все месяцы сезона наблюдается уменьшение влажности. В остальных районах – это побережье Арктики и Тихого океана (районы 1 и 7) – Δ -разнонаправлены.

Видно, что в целом динамика изменения влажности, выявленная с помощью тренд-анализа и с использованием временных интервалов, отражает общие тенденции изменения влажности. Сравнивая разницу, видно, что последний период вносит более существенный вклад в тенденции изменения влажности для большинства районов АТР.

Таблица 2

Разность (Δ) средних месячных значений относительной влажности по районам за два одинаковых сравниваемых периода: 1П – 1966–1993 гг.; 2П – 1994–2021 гг. ($\Delta = 2П - 1П$)

Рай-он	Период	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1П	82,8	82,3	82,6	83,9	86,9	88,4	89,5	90,8	89,0	86,3	84,9	83,6
	2П	82,9	82,7	83,3	84,8	86,9	88,1	88,8	89,6	88,8	87,0	85,4	83,7
	Δ	0,1	0,4	0,7	0,9	0	-0,3	-0,8	-1,2	-0,2	0,7	0,5	0,1
2	1П	76,8	77,2	77,5	77,3	80,2	76,5	73,8	79,9	83,6	84,1	80,1	78,1
	2П	77,5	77,8	78,0	78,6	80,1	74,9	74,7	80,1	84,0	85,7	81,3	78,6
	Δ	0,7	0,6	0,5	1,3	-0,1	-1,6	0,9	0,2	0,4	1,6	1,2	0,5
3	1П	75,6	74,9	70,6	64,7	61,0	61,8	67,0	73,9	75,9	78,9	78,2	76,5
	2П	76,7	75,6	71,0	65,0	61,6	63,0	68,9	75,6	77,2	81,0	79,9	77,5
	Δ	1,1	0,7	0,4	0,3	0,6	1,2	1,9	1,7	1,3	2,0	1,7	1,0
4	1П	80,4	78,1	73,5	67,4	64,6	65,6	71,0	78,2	81,0	82,5	83,2	81,4
	2П	80,6	79,4	73,4	66,4	63,7	67,0	70,9	78,6	81,2	83,9	84,0	82,1
	Δ	0,2	1,3	-0,1	-1,0	-0,9	1,4	-0,1	0,4	0,2	1,4	0,8	0,7
5	1П	78,2	76,5	75,8	66,8	58,2	63,1	69,8	72,3	71,6	75,0	79,4	79,4
	2П	77,8	76,6	73,7	63,5	57,1	63,9	69,0	70,1	70,6	73,6	79,4	79,2
	Δ	-0,4	0,1	-2,1	-3,3	-1,1	0,8	-0,8	-2,2	-1,0	-1,4	0	-0,2
6	1П	76,6	73,6	67,4	59,3	56,4	63,3	71,1	75,9	73,6	72,6	76,8	77,9
	2П	77,0	74,1	67,3	59,2	57,2	64,7	71,2	75,4	73,7	74,1	77,6	78,3
	Δ	0,4	0,4	-0,1	-0,1	0,8	1,4	0,1	-0,5	0,1	1,5	0,8	0,4
7	1П	71,3	70,9	71,3	75,7	80,0	84,4	87,4	86,0	80,8	74,4	71,7	71,8
	2П	71,7	70,1	72,0	75,5	80,3	84,5	87,5	86,3	80,6	74,1	72,3	71,5
	Δ	0,4	-0,8	0,7	-0,2	0,3	0,1	0,1	0,3	-0,2	-0,3	0,6	-0,3

Примечание: красным цветом выделены положительные значения разностей средних месячных значений относительной влажности, синим – отрицательные значения.

Выводы

Таким образом, анализ изменений относительной влажности воздуха на АТР как с помощью линейного тренда (1966–2021 гг.), так и методом разности за сравниваемые периоды (1966–1993 гг.) и (1994–2021 гг.) выявил некоторые региональные и сезонные особенности.

Годовые изменения влажности в природно-климатических районах АТР незначительны – тренд-анализ не показал чётких закономерностей годовых изменения влажности за период 1966–2021 гг.: отмечены незначительные как положительные, так и отрицательные тенденции, свидетельствующие о том, что годовые значения относительной влажности воздуха близки к норме почти на всей территории, кроме степных и лесостепных районов АТР (район 5), где отмечается отрицательный значимый тренд.

В данном районе практически во сезоны наблюдается уменьшение влажности: тренды отрицательные, причём последний период вносит большой вклад в эти изменения. Небольшое уменьшение влажности отмечается ещё на тихоокеанском побережье, но тренды здесь малы и незначимы, а разница между сравниваемыми периодами разнонаправлена.

Противоположная картина наблюдается в субарктическом районе АТР (район 3), который занимает обширную часть территории: там прослеживается чёткая картина увеличения влажности – положительные тренды наблюдаются во все центральные месяцы сезонов, при этом последние десятилетия вносят более существенный вклад в эту тенденцию (табл. 2).

Остальные районы азиатской части России показывают неоднородный характер изменения влажности по центральным месяцам сезонов: на тихоокеанском побережье АТР отмечается незначительное уменьшение влажности – тренды малы и незначимы, а в районах, находящихся под влиянием Северной Арктики (районы 1 и 2), сколь заметное уменьшение влажности наблюдается летом, когда отмечается рост температуры [12, 13], и увеличение осенью – увеличение влагосодержания за счёт таяния ледников летом и понижением температуры – осенью.

Анализ трендов по центральным месяцам сезонов показал, что лишь в январе отмечается увеличение влажности почти на всей территории азиатской части России, кроме побережья Арктики и Тихого океана. Линейный тренд за апрель, июль и октябрь показал неодинаковый характер изменения этого параметра по районам.

Таким образом, на основе результатов анализа получены новые данные пространственно-временных особенностей

изменений относительной влажности воздуха на АТР. Показано, что климат становится более изменчив, а распределение трендов влажности воздуха неоднородны в пространстве и во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы // Л.: Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
2. *Дроздов О.А. и др.* Климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 568 с.
3. *Кузнецова В.Н., Швець Н.В.* Анализ изменчивости режима влажности на территории России за последние десятилетия // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2018. Вып. 182. С. 129–141.
4. *Кузнецова В.Н., Швець Н.В.* Некоторые сезонные особенности изменений относительной влажности воздуха в различных природно-климатических зонах России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2021. Вып. 189. С. 220–232.
5. *Трофименко Л.Т., Шевченко Н.Н.* Анализ полей асимметрии и экстремумов как средство контроля качества архивных данных // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1985. Вып. 116. С. 67–77.
6. *Пановский Г.А., Брайер Г.В.* Статистические методы в метеорологии // Л.: Гидрометеиздат, 1972. С. 125–135.
7. *Коршунова Н.Н., Швець Н.В.* Изменение норм основных климатических параметров на территории России за последние десятилетия // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2014. Вып. 178. С. 11–24.
8. *Шерстюков Б.Г., Салугашвили Р.С.* Новые тенденции в изменениях климата Северного полушария в последнее десятилетие // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 175. С. 43–51.
9. *Шерстюков Б.Г.* Сезонные особенности изменения климата за 1976–2011 гг. // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2012. Вып. 176. С. 3–12.
10. *Коршунова Н.Н., Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Давлетшин С.Г.* Оценка экстремальности температурного режима и режима осадков для территории РФ и её регионов // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2018. Вып. 183. С. 20–30.
11. *Мамонтов Н.В.* Статистические характеристики относительной влажности воздуха в различные часы суток на территории СССР. М: Гидрометеиздат, 1982. 225 с.
12. *Алдухов О.А., Черных И.В.* Долгопериодные изменения температурно-влажностного режима в нижней тропосфере над Арктическим регионом России по данным радиозондирования // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2018. Вып. 183. С. 90–104.
13. *Воронцов А.А.* Климатические изменения в термическом режиме прибрежных районов арктических морей в последние десятилетия // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2018. Вып. 183. С. 51–58.

УДК 551.583.1

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ИЗМЕНЕНИЙ МЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В РОССИИ НА ДВА ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Б.Г. Шерстюков¹, А.Б. Шерстюков

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
¹ boris@meteo.ru*

В основу работы положен известный факт о том, что многолетние колебания климата Мирового океана управляют многолетними изменениями климата атмосферы наряду с другими возможными факторами. В [1] показано, что долгопериодные колебания температуры поверхности океана (ТПО) и колебания температуры воздуха (Т) на континентах происходят асинхронно. Изменения метеорологических величин на конкретной метеорологической станции наблюдаются с запаздыванием до двух-трёх десятилетий относительно изменений ТПО в удалённых частях Мирового океана. Предполагалось, что асинхронные связи можно использовать для получения прогностических оценок изменения температуры и осадков на ближайшие десять-двадцать лет по известным изменениям ТПО, произошедшим ранее.

Многолетние изменения температуры и количества осадков в каждом регионе РФ в значительной мере определяются притоком волн тепла и влаги из той или иной области Мирового океана. Глобальная океаническая циркуляция и общая циркуляция атмосферы регулируют количество и направление притока тепла и влаги с океана в район каждой метеорологической станции. Поэтому ставилась задача для каждой станции на территории РФ и для каждого месяца года найти географическую точку в Мировом океане, в которой изменения ТПО были бы асинхронно тесно связаны с изменениями температуры воздуха и количества осадков на заданной станции.

Дополнительно привлекались возможные внешние факторы, влияющие на состояние климата. Из многочисленных публикаций известно о попытках установления связей изменения климата с космическими факторами, но во всех случаях эти связи оказывались слабыми. Одной из причин слабых связей может быть инерционность климатической системы и неучтённое запаздывание отклика изменений в атмосфере относительно момента воздействия. Асинхронные связи с внешними факторами могут оказаться более информативными, чем было известно ранее.

1. Исходные данные и методы анализа

Выполнялся асинхронный корреляционный анализ связи месячной температуры воздуха и месячного количества осадков на заданной станции с изменениями ТПО в узлах географической сетки $2 \times 2^\circ$ [2] в предположении возможного запаздывания изменений температуры воздуха и количества осадков на интервал от 10 до 50 лет. Связи с меньшим временным сдвигом исключались из рассмотрения, так они не позволяют решить задачу асинхронного прогноза климата на два десятилетия. Данные о ТПО взяты из массива The Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST V5) на сетке $2 \times 2^\circ$ за 1854–2020 гг. [2]. Существует несколько версий такого архива. Каждая новая версия отличалась введением дополнительных новых данных наблюдений и усовершенствованием методов усвоения разнородных данных. Например, в третью версию ERSST v3 были добавлены спутниковые данные о ТПО с 1985 года [3]. Но затем более тщательный анализ показал, что они вызывают слишком сильное смещение. Поэтому в следующей версии ERSST v3b от спутниковых данных отказались. В последующие годы привлекались дополнительные данные и усовершенствовалась методика усвоения данных наблюдений из разных источников, включая данные о температуре воздуха на островных и прибрежных станциях. Самая последняя версия ERSST, версия 5 [4], использует новые наборы данных из ICOADS Release 3.0 о температуре поверхности океана SST, данные буёв Argo в слое 5 метров, сведения о ледовой обстановке Hadley Center Ice-SST версии 2 [5]. В архиве ERSST V5 улучшено

описание пространственной и временной изменчивости ТПО за счёт уменьшения пространственной фильтрации в функциях реконструкции данных в Мировом океане, особенно в Арктике. Авторами массива выполнено восстановление пропущенных данных статистическими методами.

Авторы рекомендуют данные архива ERSST V5 с 1880 года только для исследования долгопериодных крупномасштабных изменений, так как в рядах ТПО за ранние годы всё же остаются сглаженными локальные и короткопериодные вариации.

Сведения о ТПО привлекались в качестве основного потенциального асинхронного предиктора для прогноза. Дополнительно рассматривались возможные внешние предикторы:

- числа Вольфа – показатель солнечной активности [6];
- J_s – момент инерции барицентрического вращения Солнечной системы в горизонтальной плоскости гелиоцентрической системы координат, вычислен авторами по астрономическим данным; методика вычисления и исходные данные о Солнечной системе описаны в [1];
- J_h – момент инерции барицентрического вращения в вертикальной плоскости, также вычислен авторами по астрономическим данным; методика вычисления описана в [1];
- aa – индекс планетарной геомагнитной активности [7];
- LOD – продолжительность суток, величина, обратная скорости вращения Земли [8];
- цикл 10–19 лет – статистически определяемый цикл в исходном ряде температуры или осадков.

Ставилась задача – отобрать для каждой станции РФ наилучший узел географической сетки с данными о ТПО и информативные показатели внешних влияний на климат для поставленных прогностических целей. В работе использовались ряды месячных данных о температуре воздуха и о количестве осадков на 1543 метеорологических станциях России за 1936–2021 гг. из фонда ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Данные о ТПО и ряды данных о внешних факторах использовались за последние 200 лет.

Для каждого месяца отдельно были построены многолетние ряды (ряд январских температур, ряд февральских температур

и т. д., аналогично были составлены ряды месячных осадков). Полученные ряды температуры и осадков были сглажены по скользящим трём годам. Данные о ТПО и о продолжительности суток также были сглажены по скользящим трёхлетиями. По девяти скользящим годам были сглажены ряды момента инерции барицентрического вращения Солнечной системы, солнечной и геомагнитной активности.

Все используемые в работе ряды были стандартизованы:

$$T_i = \frac{t_i - t}{\sigma},$$

где t_i – текущее значение временного ряда; t – среднее многолетнее значение временного ряда; σ – среднеквадратическое отклонение; T_i – стандартизованная величина временного ряда.

Предстояло из всех предполагаемых предикторов отобрать наиболее для каждой станции информативные и по ним построить уравнение зависимости изменения климата на станции от предполагаемых асинхронных предикторов. Способность каждого предиктора описывать изменения температуры и осадков на станции предварительно оценивалась по коэффициенту асинхронной корреляции между временным рядом метеорологического элемента и каждым рядом предполагаемого показателя влияния на климат атмосферы. По наилучшему (по модулю) коэффициенту асинхронной корреляции определялся наилучший сдвиг (время запаздывания реакции атмосферы) каждого ряда предполагаемого фактора. Испытуемые предикторы с коэффициентом корреляции менее 0,6 исключались из дальнейшей работы. А по оставшимся предикторам (с учётом индивидуального сдвига каждого) строилось уравнение множественной регрессии.

Упомянутые предварительные коэффициенты корреляции и затем уравнения множественной регрессии вычислялись по усечённым рядам метеорологических величин за 1936–2007 гг. для испытания точности прогнозов на оставшиеся 10 лет. Данные наблюдений температуры и осадков за последние годы, не использованные при построении уравнения асинхронной регрессии, привлекались далее для оценки успешности прогнозов на

независимых данных. Успешность возможного прогнозирования температуры и осадков на 10 лет оценивалась по коэффициенту детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{D_1}{D},$$

где D – дисперсия ряда данных наблюдений, а D_1 – дисперсия ошибок. Ошибка – это разность между прогнозируемым и наблюденным значением метеовеличины.

Дисперсия ряда и дисперсия ошибок вычислялась на интервале лет независимой проверки погодичных прогнозируемых значений метеовеличины. Коэффициент детерминации 0,5 и более означает, что ошибка прогноза в два раза меньше изменчивости исходного ряда за те же годы.

2. Асинхронные связи для прогностических целей и оценки успешности прогнозов температуры воздуха

Многолетний ход T на станции сравнивался с изменениями ТПО во всех узлах и с каждым космическим предиктором. Вычислялись асинхронные коэффициенты корреляции при сдвигах от 20 до 50 лет. Сдвиг соответствовал предположению о запаздывании отклика в изменениях T на изменения ТПО и на изменения характеристик космических факторов. Из всех коэффициентов корреляции, вычисленных между T и ТПО при разных сдвигах, а также между T и внешними факторами при разных сдвигах, выбирались наилучшие коэффициенты корреляции. Сдвиги при наилучших корреляциях фиксировались.

Обоснование выбранных предикторов с многолетним запаздыванием опубликовано в [1]. Наилучшие связи оказались при запаздывании изменений температуры воздуха на 30 лет и более относительно изменений температуры поверхности океана в некотором узле географической сетки. Время запаздывания (сдвиг) увеличивалось с увеличением удалённости станции от узла.

В проведённых экспериментах было обнаружено, что привлечение ряда метеовеличин с 1936 года для построения уравнения регрессии даёт оценки менее надёжные, чем использование

более короткого ряда, начиная с 1960 года. Структура колебаний метеовеличин за более ранние годы отличается от структуры последних десятилетий. Их экстраполяция не даёт улучшения результатов прогнозирования. Поэтому конечные результаты были получены по данным наблюдений за температурой и осадками начиная с 1960 года.

Способность каждого предиктора описывать изменения температуры отдельно оценивалась по коэффициенту корреляции между температурой и каждым асинхронным предиктором на интервале 1960–2007 гг. Прогнозы строились на 2008–2017 гг. и сравнивались с данными наблюдений за те же годы. Заведомо было не известно, в каких географических районах и в какие сезоны года полезным для уравнения множественной регрессии окажется тот или иной предиктор и с каким запаздыванием проявится его влияние на температуру воздуха. Поэтому для каждого температурного ряда индивидуально подбирались состав предикторов из общего перечня предикторов, указанных ранее. Отбрасывались предикторы с коэффициентами корреляции менее 0,6 по модулю между температурой и асинхронным предиктором при наилучшем его сдвиге. Для некоторых станций из всех семи предикторов через установленный критерий отбора проходили только 3–4 предиктора, но во всех случаях данные ТПО оказывались в их числе.

В табл. 1 приведены осреднённые по 1543 станциям коэффициенты детерминации температуры воздуха на станциях России, полученные по каждому отдельному предиктору независимо.

Таблица 1

Коэффициент детерминации изменения температуры по каждому предиктору на интервале 1960–2007 гг.

	ТПО	Вольф	Js	Jh	aa	LOD	Цикл 10–19 лет
Коэффициент детерминации	0,63	0,31	0,26	0,28	0,28	0,26	0,20

Дополнительный циклический предиктор был добавлен в испытания и в таблицу после предварительных оценок ошибок прогноза изменений климата, которые показали наличие

цикличности в ошибках. Природа этой цикличности оказалась не ясной, поэтому циклический фактор был добавлен на основе предварительной статистической обработки каждого ряда T .

В обобщённом виде для всех станций табл. 1 позволяет сравнить вклады каждого из предикторов в построение уравнений асинхронной множественной регрессии. Наибольший вклад в изменения T вносит изменение ТПО, коэффициент детерминации – 0,63. Далее по убыванию коэффициента детерминации идут числа Вольфа – 0,31, геомагнитная активность – 0,28, вертикальная и горизонтальная составляющие показателя барицентрического вращения Солнечной системы – 0,26 и 0,28, скорость вращения Земли (продолжительность суток) – 0,26 и циклическая составляющая – 0,20.

По всем станциям РФ выполнено два экспериментальных прогноза погодичной среднемесячной температуры с заблаговременностью 0–9 и 10–19 лет. В обоих случаях прогнозы составлялись на 2008–2017 гг., но в первом случае регрессия строилась по температурным рядам за 1960–2007 гг., а во втором случае – по усечённым данным за 1960–1997 гг.

Рассмотрим оценки качества прогнозов на 2008–2017 гг., полученные по данным температуры на станциях за 1960–2007 гг. Прогнозы составлялись по всем станциям и по каждой из них для каждого месяца вычислялись дисперсия ошибок прогноза погодичных значений температуры, дисперсия фактической температуры за те же годы и коэффициент детерминации прогностических значений месячной температуры за 2008–2017 гг.

Карты коэффициентов детерминации прогностических значений на 2008–2017 гг. показаны на рис. 1 и 2 для каждого месяца отдельно.

Красные поля на картах – районы наиболее удачных прогнозов с коэффициентом детерминации от 0,3 до 0,9. Удачные прогнозы получались для каждого месяца в разных районах РФ. Районы с неудачными прогнозами показаны на картах белыми полями. Объяснить региональные различия можно особенностями воздушных потоков в общей циркуляции атмосферы и сезонным смещением по широте планетарной высотной фронтальной зоны,

разделяющей воздушные массы по их разному происхождению и свойствам. В каждом сезоне направление и интенсивность основных воздушных потоков различна. Поэтому в одних регионах и сезонах складываются благоприятные условия для переноса тепла и влаги с океана, а в других перенос ослаблен.

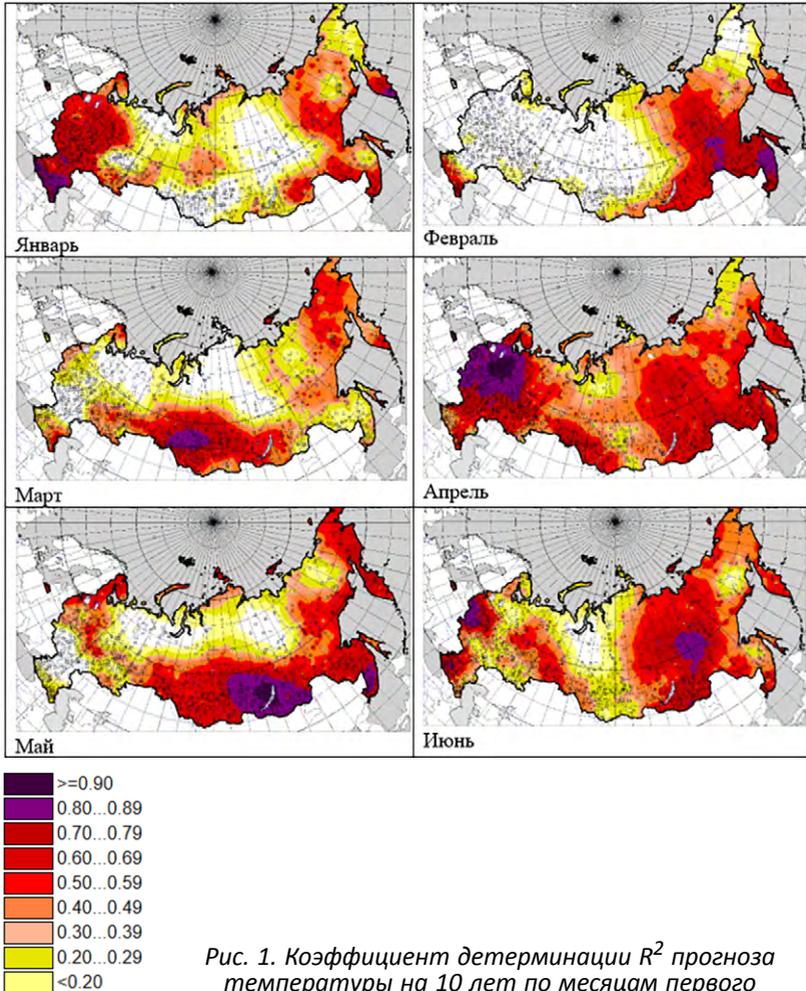


Рис. 1. Коэффициент детерминации R^2 прогноза температуры на 10 лет по месяцам первого полугодия (оценки прогнозов на 2008–2017 гг., полученные по модели за 1960–2007 гг.)

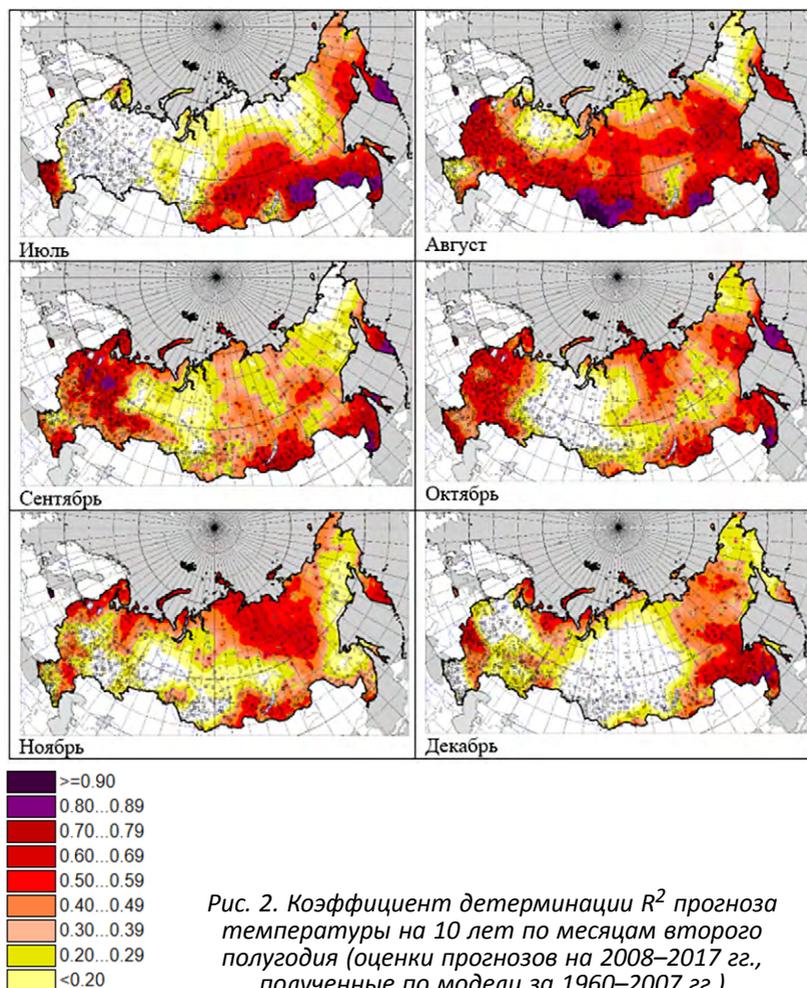


Рис. 2. Коэффициент детерминации R^2 прогноза температуры на 10 лет по месяцам второго полугодия (оценки прогнозов на 2008–2017 гг., полученные по модели за 1960–2007 гг.)

На всех картах прогнозы погодичных значений месячной температуры с заблаговременностью от 0 до 9 лет включительно оказались более успешными в регионах РФ с наибольшим влиянием океанов: европейская часть РФ и Западная Сибирь находится под влиянием Атлантики, Дальний Восток – под влиянием Тихого океана. Влияние Индийского океана прослеживается на юге всей Сибири. Хуже всего прогнозы получаются в центральной части

Сибири, на севере Сибири и Дальнего Востока, находящихся под влиянием Северного Ледовитого океана, но данных о ТПО в этом океане нет в глобальном массиве ТПО.

По результатам описанных ретропрогнозов вычислена повторяемость (в %) на станциях значений коэффициента детерминации d прогноза на первое и на второе десятилетия. В табл. 2 показаны оценки по прогнозу на 2008–2017 гг., полученные по уравнениям асинхронной множественной регрессии за 1960–2007 гг., а в табл. 3 – оценки по прогнозам на те же годы, полученные по регрессии с укороченными рядами температуры за 1960–1997 гг. Во втором случае прогнозы составлялись на 2008–2017 гг. с заблаговременностью 11–19 лет. За 100 % в каждом случае принято общее количество станций РФ.

Таблица 2

Повторяемость (в %) по градациям значений коэффициента детерминации R^2 прогноза с заблаговременностью до 9 лет месячной температуры воздуха на станциях РФ по месяцам (оценки по прогнозу на 2008–2017 гг., полученные по регрессионной модели за 1960–2007 гг.)

Месяцы	Градации коэффициента детерминации										
	$R^2 < 0,1$	$R^2 \geq 0,1$	$R^2 \geq 0,2$	$R^2 \geq 0,3$	$R^2 \geq 0,4$	$R^2 \geq 0,5$	$R^2 \geq 0,6$	$R^2 \geq 0,7$	$R^2 \geq 0,8$	$R^2 \geq 0,9$	$R^2 \geq 0,5$
Январь	4	6	5	10	13	17	17	12	11	5	62
Февраль	9	11	11	12	8	8	9	14	15	3	49
Март	10	10	10	12	12	12	13	12	7	2	46
Апрель	4	5	5	8	12	16	17	16	12	5	66
Май	6	7	8	8	10	12	12	13	15	9	61
Июнь	6	10	9	10	11	11	12	12	13	6	54
Июль	6	8	6	6	8	11	10	17	20	8	66
Август	5	7	9	11	12	13	15	14	11	4	57
Сентябрь	7	10	10	10	12	13	15	12	10	3	53
Октябрь	6	7	7	10	12	17	17	13	6	6	59
Ноябрь	7	13	11	14	13	11	12	10	5	2	40
Декабрь	5	6	7	11	12	13	12	14	13	7	59

В обеих таблицах по всем месяцам преобладают повторяемости коэффициентов детерминации больше 0,5. Это означает, что ошибка прогнозов часто в два раза меньше изменчивости температуры за 10 лет в заданный месяц на станции. Модель описывает

предстоящие изменения температуры с заблаговременностью 11–19 лет не намного хуже, чем с заблаговременностью до 9 лет.

Таблица 3

Повторяемость (в %) по градациям значений коэффициента детерминации R^2 прогноза с заблаговременностью 10–19 лет месячной температуры воздуха на станциях РФ по месяцам (оценки по прогнозу на 2008–2017 гг., полученные по регрессионной модели за 1960–1997 гг.)

Месяцы	Градация коэффициента детерминации										
	$R^2 < 0,1$	$R^2 \geq 0,1$ $R^2 < 0,2$	$R^2 \geq 0,2$ $R^2 < 0,3$	$R^2 \geq 0,3$ $R^2 < 0,4$	$R^2 \geq 0,4$ $R^2 < 0,5$	$R^2 \geq 0,5$ $R^2 < 0,6$	$R^2 \geq 0,6$ $R^2 < 0,7$	$R^2 \geq 0,7$ $R^2 < 0,8$	$R^2 \geq 0,8$ $R^2 < 0,9$	$R^2 \geq 0,9$	$R^2 \geq 0,5$
Январь	4	10	12	13	18	15	10	7	8	3	43
Февраль	10	11	10	9	9	8	13	14	13	2	50
Март	10	10	12	13	17	12	11	8	4	1	36
Апрель	6	6	9	7	12	14	16	13	11	6	60
Май	6	5	6	7	11	11	14	15	16	8	64
Июнь	6	8	8	12	10	12	13	14	14	4	57
Июль	3	6	7	6	8	11	14	17	21	7	70
Август	6	7	8	10	13	14	14	13	13	2	56
Сентябрь	8	7	11	12	14	11	13	12	9	2	47
Октябрь	7	8	9	12	14	12	10	10	11	7	50
Ноябрь	8	10	11	11	14	11	12	13	8	3	47
Декабрь	7	6	6	11	9	9	12	14	17	9	61

На рис. 3 и 4 показаны оценки коэффициента детерминации прогноза температуры с заблаговременностью 11–19 лет.

Асинхронные регрессионные соотношения, основанные на инерционных связях температуры воздуха с заведомо известными изменениями предикторов в прошлом, позволяют в некоторых районах РФ получить удовлетворительный прогностический результат на все предстоящие 20 лет. К таким районам относятся территории, находящиеся в зоне наибольшего влияния Атлантического, Тихого и, возможно, Индийского океанов. Не удаётся получить оценки тенденций на предстоящие два десятилетия в тех районах, которые относятся к зоне наибольшего влияния Северного Ледовитого океана. В глобальном архиве о температуре поверхности Мирового океана в узлах географической сетки нет данных по этому океану.

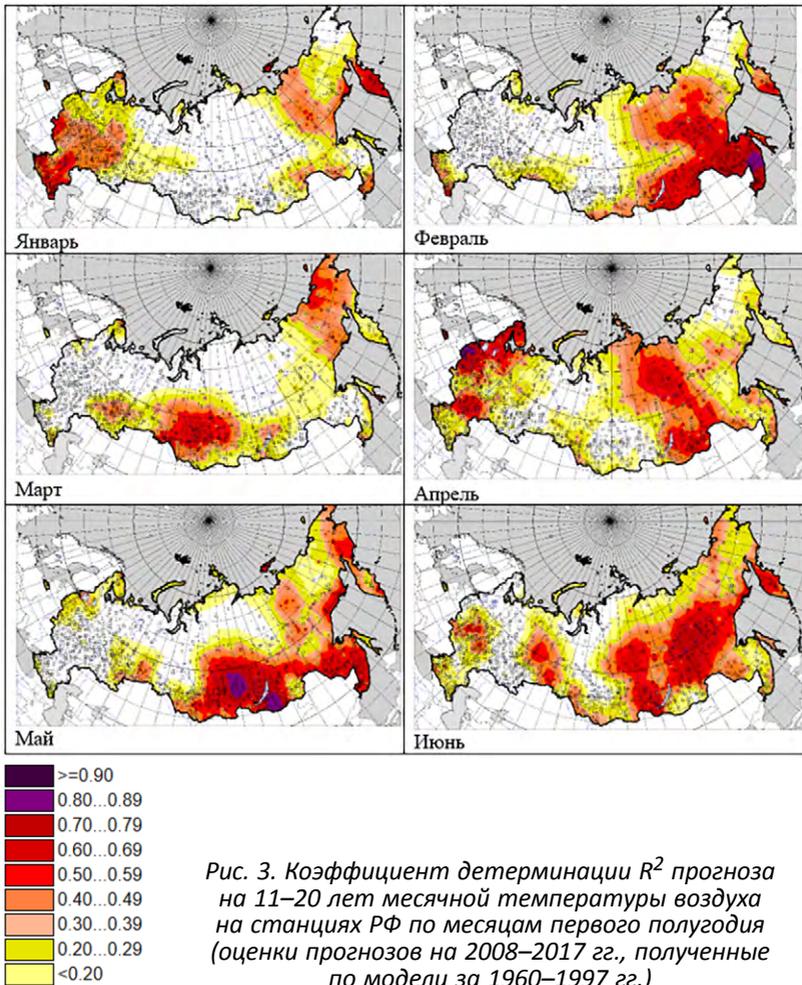


Рис. 3. Коэффициент детерминации R^2 прогноза на 11–20 лет месячной температуры воздуха на станциях РФ по месяцам первого полугодия (оценки прогнозов на 2008–2017 гг., полученные по модели за 1960–1997 гг.)

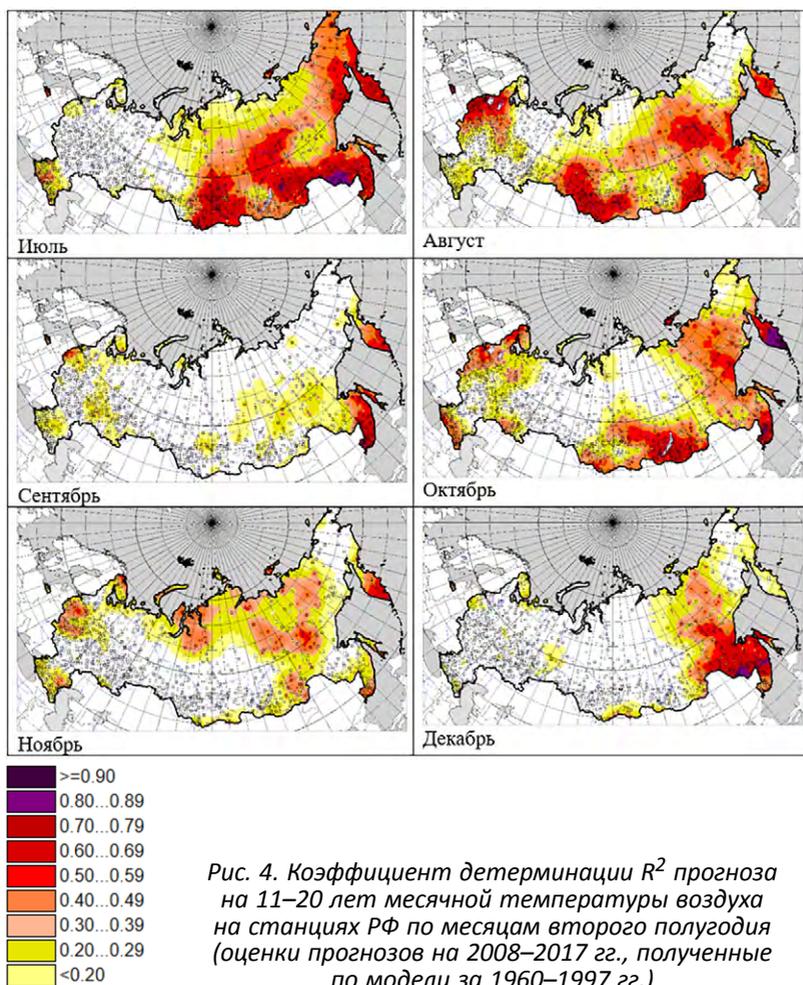


Рис. 4. Коэффициент детерминации R^2 прогноза на 11–20 лет месячной температуры воздуха на станциях РФ по месяцам второго полугодия (оценки прогнозов на 2008–2017 гг., полученные по модели за 1960–1997 гг.)

3. Асинхронные связи для прогностических целей и оценки успешности прогнозов количества осадков

В качестве предикторов для прогноза колебаний количества осадков использовались временные ряды данных о ТПО и внешних факторах, указанных выше.

Наилучшие связи оказались при запаздывании изменений количества осадков на 30 лет и более относительно изменений температуры поверхности океана в зависимости от удалённости станции от узла. Относительно других предикторов лучшие связи тоже были отобраны при сдвигах более 20 лет. Способность каждого предиктора описывать изменения количества месячных осадков оценивалась по коэффициенту корреляции между ними на интервале 1960–2007 гг. Прогнозы строились на 2008–2017 гг. и проверялись путём их сравнения с данными наблюдений за те же годы. В табл. 4 приведены осреднённые по 1543 станциям России коэффициенты детерминации количества осадков, полученные по каждому отдельному предиктору при найденных наилучших сдвигах.

Таблица 4

Коэффициент детерминации количества осадков по каждому отдельному предиктору за 1960–2007 гг.

	ТПО	Вольф	Js	Jh	aa	LOD	Цикл 10–19 лет
Коэффициент детерминации	0,61	0,27	0,23	0,23	0,25	0,22	0,24

Наибольший коэффициент – 0,61 – оказался у ТПО. Океан является главным предиктором изменений количества осадков на 10 лет. Показатель солнечной активности – числа Вольфа – дал коэффициент детерминации 0,27, индекс геомагнитной активности описывал изменение количества осадков с коэффициентом детерминации 0,25. Изменение продолжительности суток (скорости вращения Земли) описывало изменение количества осадков с коэффициентом 0,22, цикличность – с коэффициентом 0,24. Вертикальная и горизонтальная составляющие момента инерции барицентрического вращения Солнечной системы оказались предикторами с коэффициентом 0,23.

Для построения прогноза изменения осадков на 2008–2017 гг. отбирались только те из предикторов, которые за 1960–2007 гг. давали коэффициенты корреляции выше 0,6 по модулю. Таким образом, состав и количество предикторов подбиралось для каждого построения прогноза индивидуально на заданной станции для заданного месяца.

Для каждой станции и каждого месяца по отобраннным предикторам и данным об осадках за 1960–2007 гг. строилось уравнение множественной асинхронной регрессии, затем с учётом запаздывания изменений осадков относительно предикторов строился прогноз количества осадков на 2008–2017 гг. и вычислялся коэффициенты детерминации прогностических значений.

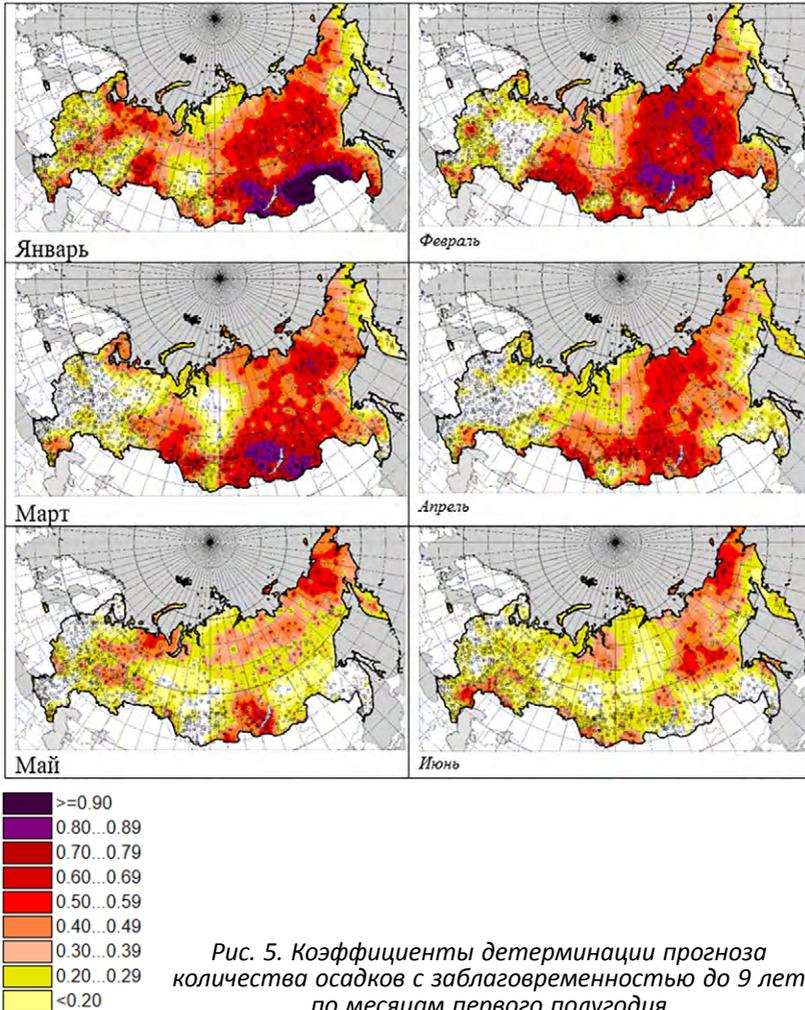
Качество прогнозов оценивалось на основе сравнения прогностических и фактических значений осадков на независимом материале за 2008–2017 гг. На рис. 5 и 6 показаны карты региональных различий коэффициентов детерминации прогноза сглаженного количества осадков на 2008–2017 гг.

Региональные и сезонные различия качества прогнозов оказались велики. Различия объясняются разными особенностями переноса воздушных масс с океана в район каждой станции и различиями эффективности проявления внешних воздействий в разных регионах России.

Возможности построения прогностических тенденций с заблаговременностью 11–19 лет тоже были исследованы. Для каждой станции и каждого месяца по отобраннным предикторам и данным об осадках за 1960–1997 гг. строилось уравнение множественной асинхронной регрессии, затем с учётом запаздывания изменений осадков относительно предикторов строился прогноз количества осадков на 2008–2017 гг. и вычислялись его коэффициенты детерминации.

По результатам описанных ретропрогнозов вычислена повторяемость (в %) на станциях значений коэффициента детерминации R^2 прогноза месячного количества осадков с заблаговременностью до 9 лет и с заблаговременностью 11–19 лет. В табл. 5 и 6 показаны оценки по прогнозам месячных сумм осадков на 2008–2017 гг., полученные с заблаговременностью до 9 лет

и 1–19 лет. За 100 % в каждом случае принято общее количество станций РФ.



Асинхронные регрессионные соотношения, основанные на инерционных связях количества осадков с заведомо известными изменениями предикторов в прошлом, позволяют в некоторых

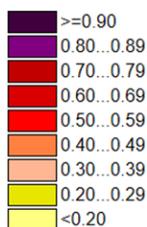
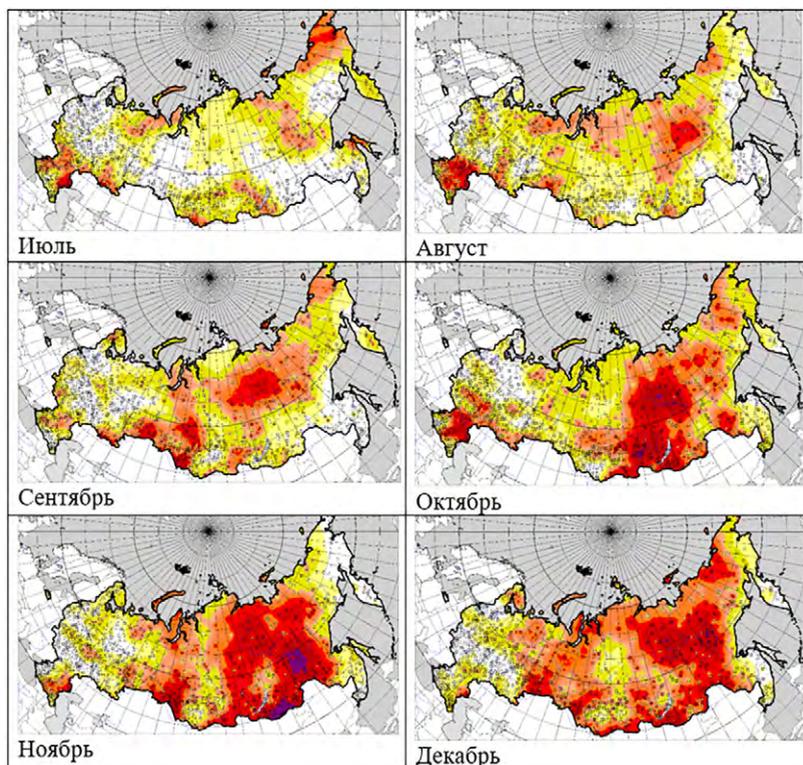


Рис. 6. Коэффициенты детерминации прогноза количества осадков с заблаговременностью до 9 лет по месяцам второго полугодия

районах РФ получить удовлетворительный прогностический результат на все предстоящие 20 лет. К таким районам относятся обширные территории преимущественно в азиатской части РФ. Связь этих районов с близостью океанов менее выражена, чем у температуры.

Таблица 5

Повторяемость (в %) по градациям значений коэффициента детерминации R^2 прогноза на 10 лет количества осадков на станциях РФ по месяцам (оценки по прогнозу на 2008–2017 гг., полученные по модели за 1960–2007 гг.)

Месяцы	Градации коэффициента детерминации										
	$R^2 < 0,1$	$R^2 \geq 0,1$	$R^2 \geq 0,2$	$R^2 \geq 0,3$	$R^2 \geq 0,4$	$R^2 \geq 0,5$	$R^2 \geq 0,6$	$R^2 \geq 0,7$	$R^2 \geq 0,8$	$R^2 \geq 0,9$	$R^2 \geq 0,5$
Январь	5	6	6	7	9	10	11	11	14	21	67
Февраль	6	6	5	5	8	8	11	11	16	23	69
Март	7	6	7	7	10	8	11	10	15	20	64
Апрель	7	5	7	8	8	12	10	18	18	7	65
Май	7	9	9	11	11	14	12	11	12	4	53
Июнь	8	10	12	12	12	12	13	11	8	3	47
Июль	8	8	10	10	13	13	13	14	9	3	52
Август	8	8	10	12	12	13	12	12	9	4	50
Сентяб.	8	10	9	12	10	13	12	13	10	3	51
Октябрь	7	7	7	8	9	11	14	13	15	11	64
Ноябрь	5	7	6	8	10	11	14	10	15	13	63
Декабрь	4	5	6	9	10	10	11	13	14	18	66

Таблица 6

Повторяемость (в %) по градациям значений коэффициента детерминации R^2 прогноза на 11–20 лет количества осадков на станциях РФ по месяцам (оценки по прогнозу на 2008–2017 гг., полученные по модели за 1960–1997 гг.)

Месяцы	Градации коэффициента детерминации										
	$R^2 < 0,1$	$R^2 \geq 0,1$	$R^2 \geq 0,2$	$R^2 \geq 0,3$	$R^2 \geq 0,4$	$R^2 \geq 0,5$	$R^2 \geq 0,6$	$R^2 \geq 0,7$	$R^2 \geq 0,8$	$R^2 \geq 0,9$	$R^2 \geq 0,5$
Январь	5	6	5	7	11	9	11	11	11	23	65
Февраль	5	7	9	7	7	9	10	14	15	18	66
Март	5	6	8	7	9	9	10	10	14	22	65
Апрель	6	6	6	8	9	12	11	14	17	10	64
Май	9	9	8	10	15	11	15	13	8	3	50
Июнь	11	10	10	10	11	13	12	10	7	4	46
Июль	8	12	9	10	9	13	13	11	11	4	52
Август	8	10	10	12	13	13	14	11	7	2	47
Сентябрь	8	8	12	10	10	12	12	15	10	4	53
Октябрь	7	8	9	8	10	11	11	12	13	11	58
Ноябрь	4	6	9	10	10	12	11	11	14	13	61
Декабрь	5	7	7	8	8	11	12	9	15	18	65

Заключение

Асинхронные регрессионные соотношения, основанные на инерционных связях температуры воздуха с заведомо известными изменениями температуры поверхности океана в узлах сетки в прошлом и с другими предикторами, позволяют примерно на половине всех станций РФ получить оценки сглаженных изменений температуры воздуха с заблаговременностью до 19 лет с ошибкой в два раза меньше изменчивости фактической температуры. К таким районам относятся территории, находящиеся в зоне наибольшего влияния Атлантического, Тихого и, возможно, Индийского океанов. Не удаётся получить оценки тенденций на предстоящие два десятилетия в тех районах, которые относятся к зоне наибольшего влияния Северного Ледовитого океана из-за отсутствия данных о ТПО по этому океану в глобальном архиве о Мировом океане.

По такой же схеме удаётся в некоторых обширных районах РФ получать удовлетворительные прогнозы сглаженных изменений количества осадков с заблаговременностью до 19 лет с ошибкой в два раза меньше изменчивости фактического количества осадков. К таким районам относятся территории преимущественно в азиатской части РФ. Связь этих районов с близостью океанов менее выражена, чем у температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шерстюков Б.Г.* Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2021. 222 с.
2. *ERSST V5.* National Centers for Environmental Information. The Extended Reconstructed Sea Surface Temperature <https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/cmb/ersst/v5/ascii/>.
3. *Smith T., Reynolds R., Peterson T., Lawrimore J.* ERRST v3. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean temperature analysis (1880–2006) // *J. of Climate.* 2008. Vol. 21. P. 2283–2296. doi:10.1175/2007JCLI2100.1.
4. *National Centers for Environmental Information/NESDIS/NOAA/U.S. Department of Commerce.* 2019, updated monthly. NOAA NCEI Extended Reconstructed Sea Surface Temperature. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/JZ08-3W17>. Accessed 01.02.2021.

5. *Rayner N., Parker D., Horton E., Folland C., Alexander L., Rowell D., Kent E., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, N D14, 4407 10.1029/2002JD002670.

6. *Sunspot data.* Sunspot data from the World Data Center SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels. <http://sidc.be/silso/datafiles#total>].

7. *Mayaud P.-N.* The aa Indices: A 100-Year Series Characterizing the Magnetic Activity // *J. Geophys. Res.* 1972. Vol. 77, N 34, P. 6870–6874, URL: http://isgi.unistra.fr/indices_dst.php.

8. *Bizouard C., Lambert S., Gattano C., Becker O., Richard J.-Y.* The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014 // *J. Geod.* 2019. Vol. 93. Issue 5. P. 621–633. URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1186-3> (дата обращения: март 2022).

УДК 551.465.7

МОНИТОРИНГ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕСИМО

Н.А. Вязилова

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
nav@meteo.ru*

Введение

Информация о штормовой деятельности в океанах и морях, количестве и интенсивности штормов очень важна в судостроении, транспортных перевозках нефти и газа, в планировании безопасных курсов для судов, развитии прибрежных районов и т.д. Представляемые на портале ЕСИМО показатели и индикаторы циклонической и штормовой активности рассчитываются в рамках прикладной задачи ЕСИМО «Разработка методов и средств климатического анализа циклонической и штормовой активности в Европейском и Арктическом регионах РФ в целях развития морского гидрометеорологического обеспечения ЕСИМО». Расчёт показателей циклонической и штормовой активности проводится в регионе с координатами (30 ° с.ш. – 85 ° с.ш., 50 ° з.д. – 70 ° в.д.), который включает акваторию Северной Атлантики, территорию Европы, в том числе и Европейскую территорию России, а также субполярные районы Арктики.

В настоящее время современные данные реанализов позволяют обеспечить мониторинг рассчитываемых характеристик циклонической и штормовой активности в выбранных районах Мирового океана в ежемесячном временном масштабе. Разработанные методы и средства Единой системы информации обстановки в Мировом океане (ЕСИМО) позволяют представлять рассчитанные характеристики циклонической активности на портале ЕСИМО в виде карт пространственного распределения и графиков временного изменения.

1. Данные и методы расчёта траекторий циклонов

Все представляемые в настоящее время показатели и индикаторы циклонической активности рассчитываются на основе 6-часовых синоптических данных реанализа NCEP-DOE [1]. Для идентификации центров циклонов, расчёта траекторий их смещения и показателей циклонической и штормовой активности используются следующие виды данных реанализа:

- данные атмосферного давления на уровне моря (MSLP) в узлах сетки $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$;
- данные составляющих скорости ветра в узлах сетки $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ на изобарической поверхности 925 гПа;
- данные интенсивности осадков в нижнем слое атмосферы в узлах сетки Гаусса.

Центры внетропических циклонов по данным реанализов в узлах сетки идентифицируются в основном по данным минимума атмосферного давления на уровне моря или максимума относительной завихренности на изобарической поверхности 1000 или 850 гПа. В настоящей работе процедура идентификации центров циклонов проводится на основе минимального давления на уровне моря (MSLP) и предусматривает выполнение следующих основных требований:

- значение давления в точке (предполагаемом центре циклона) должно быть меньше по сравнению с окружающими 8 точками;
- минимальное значение осреднённого градиента давления между центром и окружающими 8 точками должно быть не меньше 0,15 гПа на 100 км;
- градиент давления между каждой из 8 точек и ближайшими внешними точками должен быть отрицательным.

Применённый метод идентификации центров циклонов более подробно описан в предыдущих работах автора настоящей статьи [2, 3] при анализе циклонической и штормовой активности в Северной Атлантике и Европе. После идентификации центров циклонов в каждый срок наблюдения для каждого центра циклона определяется максимальная скорость ветра и максимальная

интенсивность осадков в районе центра циклона. Для анализа скорости приземного ветра в районах циклонов по данным реанализа NCEP-DOE использовались данные составляющих скорости ветра на поверхности 925 гПа. Возможность использования данных скорости ветра на выбранной поверхности в качестве приземных подтверждается анализом взаимосвязи между ветром на поверхности 925 гПа и скоростью ветра на уровне 10 м, проведённым в [4] по данным реанализа ERA-40. Для анализа выбиралась максимальная скорость ветра из района, близкого к центру циклона. Для анализа осадков в циклонах использовались данные интенсивности осадков в узлах сетки Гаусса реанализа NCEP-DOE. В каждый срок наблюдения в районе каждого центра циклона выбиралось максимальное значение интенсивности осадков. В идеальном случае размер такого района определяется размером циклона, но в данной работе, так же, как и в [4], в качестве вполне репрезентативного был принят район с радиусом в 5 градусов.

Алгоритм расчёта траекторий смещения центров циклонов включает процедуру идентификации продолжающихся циклонов (циклонов, идентифицированных в предыдущий срок наблюдения) и вновь образующихся. Процедура контроля циклонических центров и идентификации их принадлежности к уже существующим или новым циклонам включает расчёт дистанции (расстояния) между центрами циклонов, идентифицированными в данный и предыдущий сроки наблюдений, и сравнение этой дистанции с критическим заданным значением. Если рассчитанное расстояние меньше заданного значения, то данный идентифицированный центр циклона относится к уже существующему (с номером n); если расстояние больше заданного, то фиксируется вновь образованный циклон, которому присваивается другой номер. Согласно климатологическим исследованиям, максимальная скорость перемещения циклонов в Северной Атлантике не превышает 100 км/ч, поэтому можно предположить, что за 6 часов (время между сроками наблюдения) существующий циклон может сместиться максимально на 600 км. Именно это расстояние в качестве критического используется в [2–5], а также принято для расчётов траекторий смещения центров циклонов и в данном

исследовании. После расчёта траекторий для каждого календарного месяца формируется файл с траекториями циклонов. Траектории циклонов выстраиваются в соответствии с номерами циклонов и координатами их центров.

2. Перечень основных показателей циклонической и штормовой активности

Рассчитываемые показатели циклонической активности можно разделить на три группы. Первую группу показателей представляют собственно траектории циклонов, рассчитанные для последнего календарного месяца. Для каждой траектории указываются координаты центра циклона (широта и долгота), значение давления и аномалии давления относительно климатической нормы в центре циклона, значение максимальной скорости и интенсивности осадков в районе центра циклона, а также общее время жизни циклона – число сроков наблюдения, в которые зафиксирован данный циклон.

Во вторую группу входят показатели, представляющие значения рассчитываемых параметров в узлах сетки. Такие показатели дают возможность показать особенности пространственного распределения характеристик циклонической активности. К таким показателям относятся прежде всего количество центров циклонов и индекс циклонической активности, рассчитываемые отдельно для каждой точки сетки исследуемого региона.

В третью группу показателей входят интегральные региональные характеристики циклонической активности, рассчитываемые для каждого выбранного района за единицу времени, в данном случае – за календарный месяц. Такие показатели позволяют получить графики временного изменения характеристик циклонической активности. К таким показателям в данной работе относятся плотность траекторий циклонов, плотность центров циклонов, интегральный индекс циклонической активности.

Плотность траекторий циклонов представляет количество траекторий циклонов, проходящих через район исследования в единицу времени (месяц, сезон, год).

Плотность центров циклонов рассчитывается как интегральное количество идентифицированных центров циклонов в исследуемом районе за единицу времени (месяц, сезон, год).

Интегральный индекс циклонической активности представляет сумму аномалий атмосферного давления в центрах циклонов исследуемого района за календарный месяц. Интегральные показатели рассчитываются для всего исследуемого региона, а также для отдельных выделенных районов Балтийского и Баренцева морей.

Для оценки штормовой активности за последний календарный месяц в районах Балтийского и Баренцева морей по значениям максимальной скорости ветра в центрах циклонов для каждого календарного месяца рассчитывается повторяемость центров циклонов по градациям скорости ветра по шкале Бофорта.

3. О комплексе программ расчёта характеристик циклонической активности по данным реанализа NCEP-DOE

Для реализации численной модели идентификации циклонов и расчёта параметров циклонической активности по данным реанализа NCEP-DOE был разработан комплекс программ, включающий следующие модули:

- идентификации центров циклонов по наблюдениям атмосферного давления на уровне моря для каждого срока наблюдения, вычисления максимальной скорости ветра и интенсивности осадков в районах центров циклонов в каждый срок наблюдения в течение одного календарного месяца;
- расчёта траекторий циклонов за период календарного месяца в выбранном регионе исследования;
- расчёта показателей циклонической и штормовой активности в выбранном регионе для представления их на портале ЕСИМО в виде информационных ресурсов.

4. Представление показателей на портале ЕСИМО

Информационные ресурсы (ИР) с показателями циклонической и штормовой активности, представленные на портале ЕСИМО, можно разделить на три группы в соответствии с показателями,

значения которых они представляют. К первой группе ИР относятся прежде всего траектории циклонов со значениями атмосферного давления, максимальной скорости ветра и интенсивности осадков в центрах циклонов. Положение центров циклонов, широта и долгота позволяют выстраивать траектории циклонов на карте, выделять для анализа отдельные траектории циклонов по их номеру, выявлять районы генезиса и затухания циклонов. Карты траекторий циклонов представлены с индикацией значений атмосферного давления, максимальной скорости ветра и интенсивности осадков в центрах циклонов в каждый срок наблюдения (рис. 1).

Ко второй группе относятся информационные ресурсы с интегральными, суммарными за месяц, значениями показателей в узлах сетки для всего региона Северной Атлантики и Европы. Такие ИР дают возможность построить карты и получить представление о пространственном распределении характеристик циклонической активности в последний календарный месяц. К ним относятся ИР, представляющие плотность центров циклонов и индекс циклонической активности в узлах сетки за последний календарный месяц (рис. 2).

В третью группу входят ИР с интегральными значениями показателей циклонической и штормовой активности, рассчитанные для отдельных выбранных районов. Интегральные характеристики циклонической активности, рассчитываемые в настоящей работе, – это количество траекторий циклонов, количество центров циклонов и индекс циклонической активности, представляющие суммарное значение характеристики по выбранному району за календарный месяц.

Ежемесячные значения интегральных показателей представлены в соответствующих информационных ресурсах на портале ЕСИМО. Средствами интерфейса можно получить графики их временного изменения (рис. 3) как за весь рассчитываемый период, так и отдельно выделенный период, например календарный год.

Интегральные показатели рассчитываются отдельно для двух групп циклонов. В первую входят все идентифицированные в исследуемом районе циклоны, во вторую – только центры циклонов

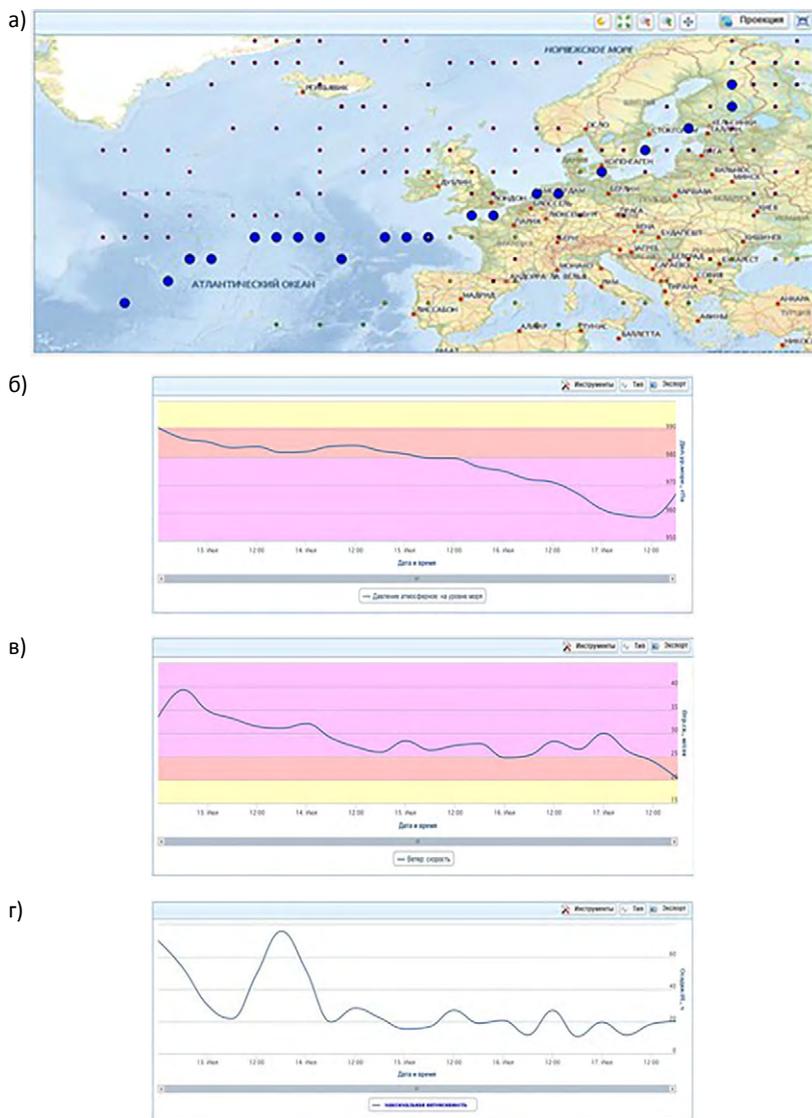
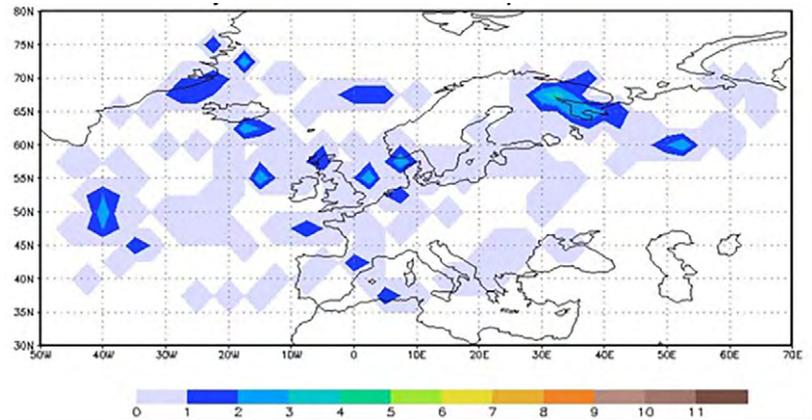


Рис. 1. Пример представления на портале ЕСИМО траектории шторма: положение в пространстве (а), графики изменения атмосферного давления, гПа (б), максимальной скорости ветра, м/с (в), интенсивности осадков, мм/сут (г) в циклоне. Июль 2022 г.

с давлением от 980 гПа и менее. Интегральные показатели циклонической активности на портале ЕСИМО представлены для районов Северной Атлантики, Балтийского и Баренцева морей, арктической зоны РФ.

а)



б)

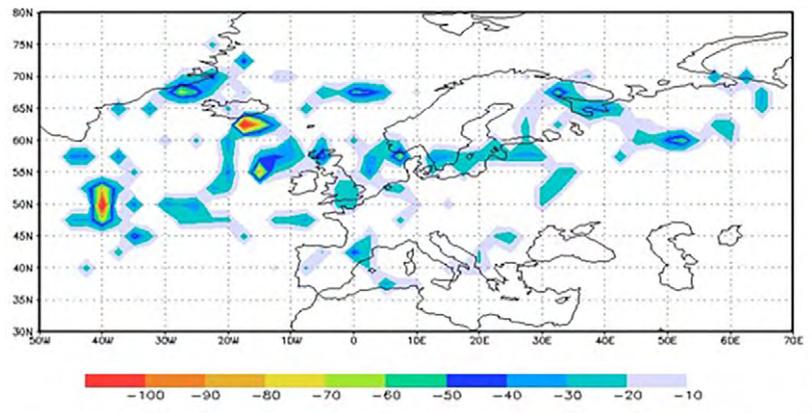
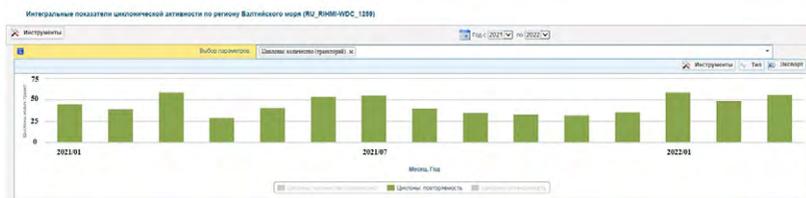


Рис. 2. Пример представления на портале ЕСИМО карт пространственного распределения ежемесячных интегральных характеристик циклонической активности: а) количество центров циклонов; б) индекс циклонической активности. Июль 2022 г.

а)



б)



в)



Рис. 3. Пример изменения количества траекторий циклонов (а), центров циклонов (б) и индекс циклонической активности (в) в районе Балтийского моря. Период – с января 2021 по март 2022 года.

На рис. 4 представлено распределение количества центров циклонов по градациям скорости ветра (по шкале Бофорта) в районах Балтийского и Баренцева морей, построенное по данным в ИР ЕСИМО: RU_RINMI-WDC_1720 и RU_RINMI-WDC_3062. Согласно шкале Бофорта, которая часто используется для классификации штормов по скорости ветра, циклоны со скоростью ветра от 17,2 до 24,5 м/с относятся к умеренным штормам (8,9 баллов по шкале Бофорта), циклоны со скоростью ветра более 24,5 м/с – к интенсивным или жестоким штормам (10, 11, 12 баллов по шкале Бофорта).

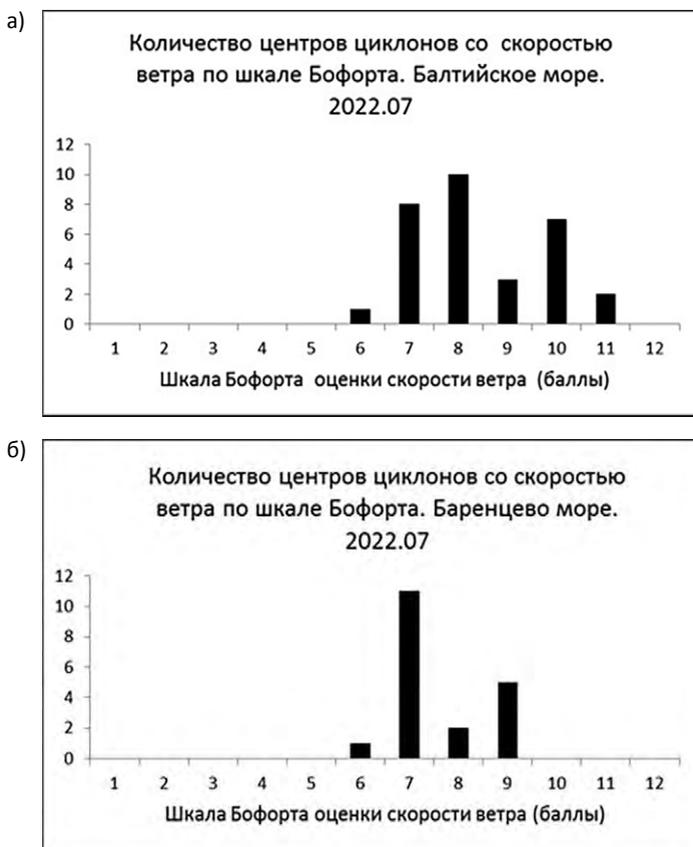


Рис. 4. Пример повторяемости количества центров циклонов по градациям скорости ветра (шкала Бофорта) в районе Балтийского (а) и Баренцева (б) морей. Июль 2022 г.

Заключение

Показатели циклонической и штормовой активности, значения которых ежемесячно обновляются и представляются на портале ЕСИМО в виде таблиц, графиков и карт, дают возможность, во-первых, получить оценку циклонической активности на акватории Северной Атлантики, территории Европы, в том числе на европейской части России и в субполярных арктических районах РФ,

за последний календарный месяц. Представленные в данной статье в виде примеров карты и графики для июля 2022 года позволяют отметить повышенную циклоническую и штормовую активность в данном месяце на акватории Атлантики, а также в районе Балтийского моря и в северо-западном районе РФ.

Во-вторых, ежемесячные значения показателей, рассчитанных за весь период исследования – с 1979 года по настоящее время, дают возможность получить климатические характеристики циклонической и штормовой активности в исследуемом регионе и показать особенности её межгодовой изменчивости. Анализ таких характеристик представлен в целом ряде работ автора настоящей статьи, в том числе и в [2, 3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L.* NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2002. Vol. 83. P. 1631–1643.
2. *Вязилова Н.А.* Циклоническая активность и колебания циркуляции в Северной Атлантике // *Метеорология и гидрология.* 2012. № 7. С. 5–14.
3. *Viazilova N.A., Viazilov A.E.* On climatology of storm cyclones entering European region of Russia // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. Vol. 611. N 1.
4. *Bengtsson L., Hodges K.I., Keenlyside N.* Will Extratropical Storms Intensify in a Warmer Climate? // *J. Climate.* 2009. Vol. 22. P. 2276–2301.
5. *Алекперов М.Г., Мохов И.И.* Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46, № 5. С. 620–637.

УДК 551.465.7

ЦИКЛОНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5 И КОЛЕБАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Н.А. Вязилова¹, А.Е. Вязилов²

¹ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
nav@meteo.ru;

² ФГБУ «Научно-производственное объединение ТАЙФУН»,
vyazilov@typhoon.obninsk.ru

Введение

Анализ циклонической и штормовой активности на Европейской территории России (ЕТР) показывает [1], что подавляющая часть циклонов и штормов выходит на ЕТР из районов Балтийского, Средиземного и Баренцева морей, районов их генерации, а также регенерации из циклонов, приходящих с акватории Северной Атлантики. Межгодовая изменчивость количества и интенсивности циклонов и штормов, выходящих на ЕТР из указанных районов, в значительной степени может определяться общей циклонической активностью в этих районах, на которую в свою очередь могут влиять различные факторы.

Согласно выводам ряда исследований [2–5], определяющим фактором, влияющим на погоду и климат в Северной Атлантике, является Северо-Атлантическое колебание (САК). Для количественной оценки развития САК обычно используется индекс NAO, рассчитываемый по полю давления на уровне моря (SLP), для которого существует наиболее длительный ряд инструментальных наблюдений. Обычно индекс NAO вычисляется как разность нормированных значений давления на станции Гибралтар (Лисбон или Понта Дельгада) и станции Рейкьявик. Однако, как отмечено в ряде работ [6, 7], для характеристики аномалий циркуляции в Европейском регионе одного индекса NAO недостаточно. Согласно выводам [7], индекс NAO отражает изменения только широтного

положения основной зоны штормов в Северной Атлантике, но не изменение количества и интенсивности циклонов в Европейском регионе. Для более полной картины развития аномалий циркуляции в Европе необходимо учитывать индексы, представляющие и другие колебания климатической системы в данном регионе: восточно-атлантического колебания (индекс EA), колебания Восточная Атлантика – Западная Россия (индекс EA/WR), скандинавского колебания (SCA). Следует отметить, что региональные колебания климатической системы могут совпадать, а могут и не совпадать по фазе развития, и в различной комбинации друг с другом обеспечивать существенные различия в картине аномалий циркуляции в исследуемом регионе. Например, в [3] были показаны значительные отличия в полях аномалий приземного давления в Северной Атлантике в зимний сезон при различных комбинациях индексов NAO и EA и сделано предположение о том, что причиной этих отличий могут быть особенности циклогенеза, развивающегося при различных сочетаниях фаз указанных видов колебаний.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы показать взаимосвязь межгодовой изменчивости циклонической активности в основных районах генезиса циклонов, выходящих на Европейскую территорию России в зимний сезон, с колебаниями крупномасштабной атмосферной циркуляции в регионе Северной Атлантики и Европы. Анализ выполнен для 42 зимних сезонов, начиная с зимнего сезона 1979/1980 и заканчивая зимним сезоном 2020/2021 гг.

1. Данные и методика анализа

Для исследования были использованы 6-часовые данные приземного давления за период с октября 1979 г. по март 2021 г., данные реанализа ERA5 [8] в узлах сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Идентификация циклонов проводилась в регионе Северной Атлантики и Европы с координатами от 30° с.ш. до 80° с.ш., от 50° з.д. до 70° в.д.

Алгоритм автоматической идентификации и определения траекторий движения циклонов включает процедуры идентификации центров циклонов, вычисления траекторий циклонов и

расчёта параметров циклонической активности. В данной работе для идентификации циклонов используются данные давления на уровне моря (MSLP). Процедура идентификации центров циклонов по данным реанализа ERA5 и алгоритм расчёта их смещения, траекторий циклонов подробно описаны в работе авторов [1]. Следует отметить, что обычно при автоматической идентификации центра циклона по данным реанализа расстояние между предполагаемым центром циклона и окружающими точками определяется шагом сетки, например в случае использования данных реанализа NCEP-DOE – это $2,5^\circ$. Данные ERA-5/ECMWF имеют шаг сетки $0,25^\circ$. Учитывая, что атлантические циклоны представляют крупномасштабные явления со средним радиусом около 600 км [9], а над акваторий океана значение радиуса может быть значительно больше этой средней величины, идентификация центров циклонов по данным ERA5/ECMWF проводилась не с шагом $0,25^\circ$, а с шагом $1,25^\circ$.

Для расчёта параметров циклонической активности в данном исследовании отбирались только циклоны, в период жизни которых хотя бы раз давление в центре было меньше 1000 гПа, и с продолжительностью жизни от 12 часов и более. В качестве характеристик циклонической активности, ежемесячных и средних за зимний сезон, для каждой точки сетки региона исследования рассчитывались плотность циклонов и индекс циклонической активности. *Плотность циклонов* представляет количество идентифицированных центров циклонов в данной точке за календарный месяц. *Индекс циклонической активности* вычисляется как сумма аномалий атмосферного давления в центрах циклонов в каждой точке сетки за календарный месяц. Аномалии приземного давления в центрах циклонов были рассчитаны относительно ежемесячных климатических данных за период 1980–2010 гг.

На основе данных в узлах сетки для районов Баренцева [$66^\circ\text{N}–80^\circ\text{N}$, $10^\circ\text{E}–70^\circ\text{E}$], Балтийского [$52^\circ\text{N}–68^\circ\text{N}$, $7^\circ\text{E}–31^\circ\text{E}$], и Средиземного [$30^\circ\text{N}–45^\circ\text{N}$, $10^\circ\text{W}–45^\circ\text{E}$] морей для каждого зимнего сезона, с октября по март, были рассчитаны интегральные показатели циклонической активности (суммарные по выбранному региону за сезон), а также их скользящие 5-летние

средние значения. Интегральные региональные показатели дают возможность показать временную изменчивость циклонической активности в выбранных районах исследуемого региона. Общая циклоническая активность в каждом из исследуемых районов включает все циклоны и шторма, идентифицированные в районе, как генерируемые в этом районе, так и проходящие через данный район в определённый период времени (месяц, сезон). Основные характеристики циклонической активности, рассчитываемые в данной работе, включают количество центров циклонов и интегральную интенсивность циклонов в исследуемом районе.

Для анализа особенностей пространственного распределения характеристик по данным в узлах сетки были построены карты среднемноголетнего распределения характеристик циклонической активности за зимний сезон, а также карты композитных средних характеристик для выборок лет, отличившихся различной комбинацией сочетания фаз развития северо-атлантического и восточно-атлантического колебаний в зимний сезон. Выборки лет формировались на основе индексов NAO и EA, публикуемым на сайте Национального метеорологического центра США. В первую выборку вошли годы с положительной фазой и северо-атлантического, и восточно-атлантического колебания, во вторую – годы с отрицательной фазой обоих колебаний (таблица). Зимний сезон включался в выборку при условии превышения среднего за сезон значения индекса, NAO или EA, по абсолютной величине 0,5. Каждая из таких выборок включает по три года. Отдельно были выделены зимние сезоны, отличившиеся интенсивным развитием колебаний противоположной фазы. Для каждой выборки были рассчитаны средние композитные значения характеристик циклонической активности и построены карты их пространственного распределения. Карты пространственного распределения характеристик циклонической активности построены также для отдельных выделенных лет, отличившихся наиболее интенсивным развитием одного из видов колебаний. К интенсивному развитию фазы колебания были отнесены зимние сезоны со средним значением индекса NAO (в случае северо-атлантического колебания) или EA (в случае восточно-атлантического колебания), равным или более 1,0.

2. Результаты исследования

О межгодовой изменчивости характеристик циклонической активности. Сравнение межгодового изменения индекса циклонической активности в выбранных районах Северной Атлантики в зимний сезон (рис. 1) показывает, что максимальными значениями индекса в течение всего периода исследования отличается район Исландского минимума (по абсолютной величине от 6×10^3 до 13×10^3 гПа), минимальными – район Средиземного моря (от 1×10^3 до 4×10^3 гПа).

В районе Баренцева моря тенденция межгодовой изменчивости индекса циклонической активности в течение всего периода исследования аналогична тенденции изменчивости данного параметра в районе Исландского минимума, хотя сами значения индекса циклонической активности в районе Баренцева моря слабее. И в первом, и во втором регионе усилением циклонической активности выделяется период с конца 1980-х – середина 1990-х гг., далее идёт период ослабления циклонической активности, и в последние два десятилетия вновь наблюдается тенденция к её усилению.

Выделим зимние сезоны, отличившиеся существенным усилением и ослаблением циклонической активности сразу в нескольких выделенных районах: Исландского минимума, Баренцева

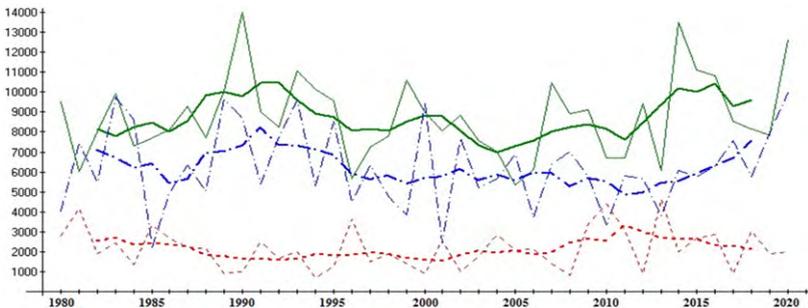


Рис. 1. Индекс циклонической активности (в гПа) в зимний сезон в районах Исландского минимума (сплошная линия), Баренцева моря (точка-тире) и Средиземного моря (точки). Жирная линия – скользящие средние за пять лет.

морья, Балтийского моря. Максимальное усиление циклонической активности в указанных районах отмечалось в зимние сезоны 1989/1990, 1999/2000, 2013/2014, 2019/2020 гг. Минимальные значения индекса циклонической активности отмечены в зимние сезоны 1984/1985, 2005/2006, 2009/2010.

В районе же Средиземного моря в эти годы наблюдалась обратная тенденция. Максимальное усиление циклонической активности наблюдалось в 1984/1985, 2005/2006, 2009/2010, существенное ослабление отмечено в зимние сезоны 1989/1990, 1999/2000 гг. В целом период ослабления циклонической активности в этом районе отмечен с начала 1990-х до 2000-х годов, а затем наблюдается значительное усиление активности циклонов.

Особенности циклонической активности в годы северо-атлантического и восточно-атлантического колебаний. В таблице представлены выборки зимних сезонов, отличившихся различной комбинацией фаз северо-атлантического и восточно-атлантического колебаний, а также соответствующие этим сезонам средние значения индексов NAO и EA. Важно отметить, что зимние сезоны, отличившиеся совпадением положительной фазы колебаний, отличились также и максимальными значениями интегрального индекса циклонической активности в районах Исландского минимума, Баренцева и Балтийского морей. И наоборот, в зимние сезоны с отрицательной фазой САК и ВАК в этих районах наблюдались также и минимальные значения индекса.

На рис. 2 представлено пространственное распределение средних многолетних значений индекса циклонической активности в зимний сезон (рис. 2а), а также средних композитных значений индекса для выборок лет с положительной фазой САК и ВАК (рис. 2б), и выборок лет с отрицательными фазами колебаний (рис. 2в).

Сравнение показывает, что в зимние сезоны, отличившиеся одновременным интенсивным развитием положительных фаз колебаний, наблюдается значительное усиление циклонической активности по сравнению со средними многолетними значениями, как на акватории Северной Атлантики в районе Исландского минимума, так и в северных широтах Европы и субполярных

широтах Атлантики, в том числе в районе Баренцева моря. Учитывая, что величина индекса циклонической активности представляет сумму аномалий атмосферного давления (в точке или по региону за период времени), усиление циклонической активности в указанных выше районах в отдельные зимние сезоны может быть связано как с увеличением общего количества циклонов, так и с увеличением экстремально глубоких циклонов.

Характерной особенностью зимних сезонов, отличившихся совпадением отрицательных фаз колебаний (рис. 2в), является существенное ослабление циклонической активности как в районе Исландского минимума, так и в субполярных широтах Атлантики, и её усиление в умеренных и субтропических широтах акватории Северной Атлантики.

Т а б л и ц а

Выборки лет с развитием фаз САК и ВАК в течение зимнего сезона, представленными средними значениями индексов NAO и EA с октября по март

Зимний сезон	NAO	EA	САК	ВАК
NAO+ EA+				
1989/1990	+0,8	+0,4	++	+
2013/2014	+0,9	+1,2	++	++
2019/2020	+0,5	+0,8	+	++
NAO- EA-				
1984/1985	-0,6	-0,1	--	
1995/1996	-0,7	-0,4	--	-
2005/2006	-0,6	-0,4	--	-
NAO+ EA-				
1999/2000	+0,8	-0,5	++	-
NAO- EA+				
2009/2010	-1,3	+0,6	--	+

Рис. 3 демонстрирует пространственное распределение количества центров циклонов и индекса циклонической активности в зимний сезон 2009/2010 гг., отличившихся существенным ослаблением САК (среднее за зимний сезон значение индекса NAO = -1,3) и интенсивной положительной фазой ВАК.

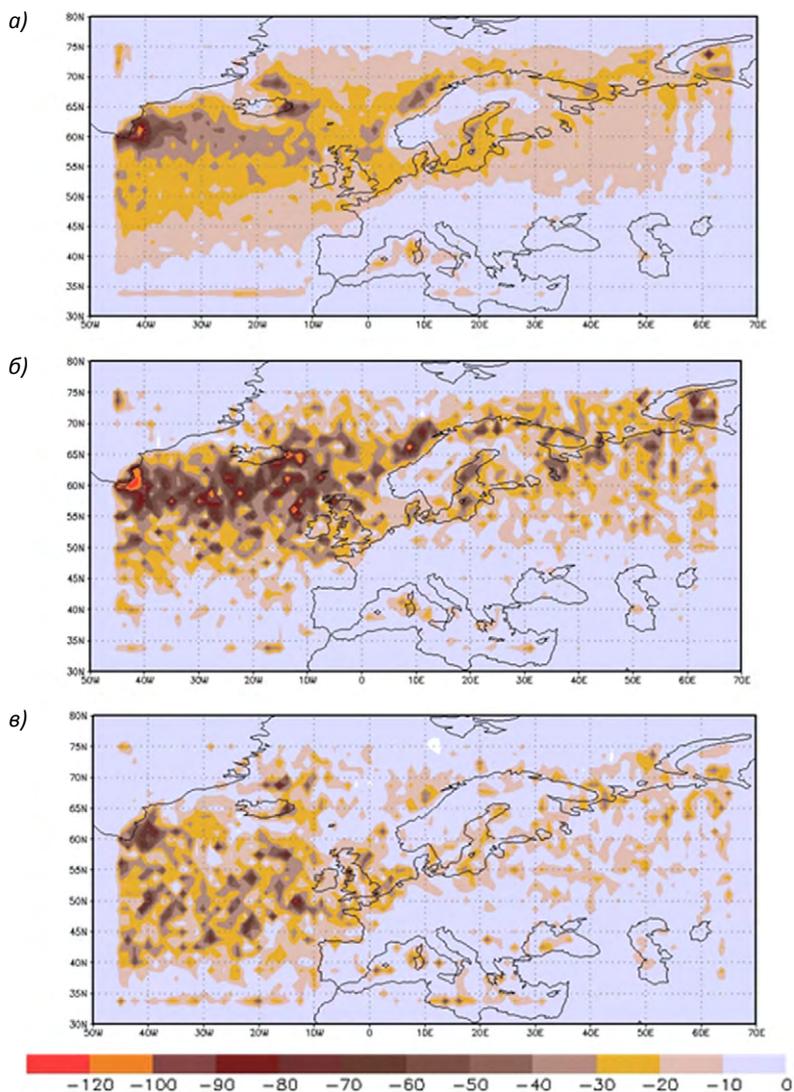


Рис. 2. Пространственное распределение индекса циклонической активности в зимний сезон: а) средние многолетние значения индекса за период 1979/1980–2020/2021 гг.; б) средние значения индекса для лет с положительными фазами САК и ВАК (1989/1990, 2013/2014, 2019/2020 гг.); в) средние значения индекса для лет с отрицательными фазами САК и ВАК (1984/1985, 1995/1996, 2005/2006 гг.).

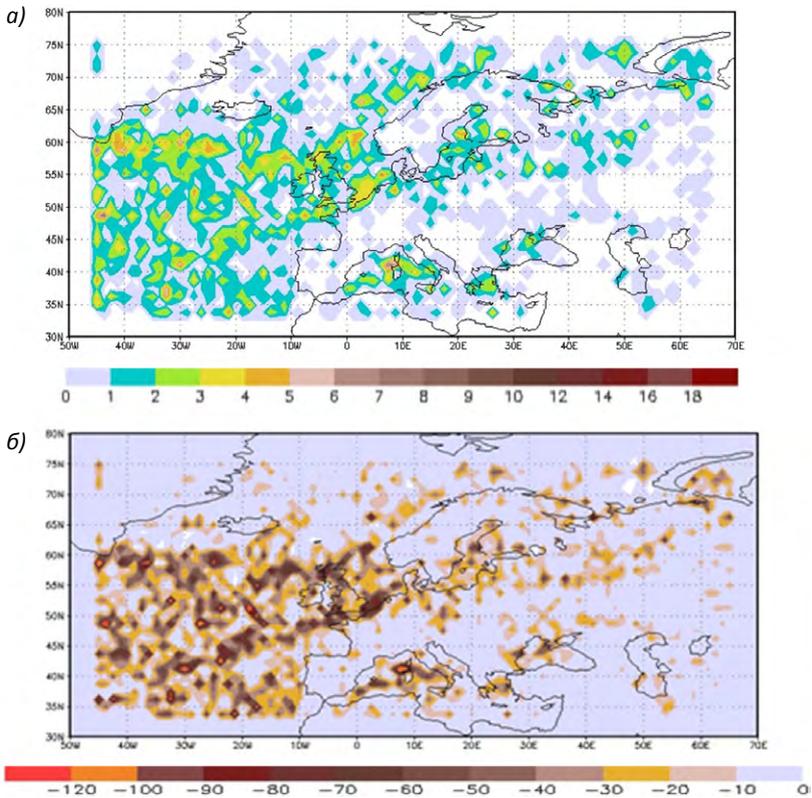


Рис. 3. Пространственное распределение количества центров циклонов (а) и индекса циклонической активности (б) в зимний сезон 2009/2010 гг. с отрицательной фазой САК и положительной фазой ВАК

Анализ особенностей пространственного распределения количества циклонов и индекса циклонической активности в зимний сезон 2009-2010 гг. даёт основание предполагать, что значительное ослабление циклонической активности в районах Исландского минимума и Баренцева моря и её заметное усиление в районе Средиземного моря, отмеченное в предыдущем параграфе, в этот зимний сезон связано с аномалиями крупномасштабной циркуляции атмосферы, а именно с развитием интенсивной отрицательной фазы САК и интенсивной положительной фазы ВАК.

Положительная фаза ВАК на Европейском континенте проявляется чаще всего в усилении циклонической активности в умеренных и субполярных широтах (рис. 2б), но в зимний сезон, 2009/2010 гг., на фоне интенсивного ослабления северо-атлантического колебания, усиление циклонической активности наиболее сильно проявилось в южных районах Европы.

О статистической взаимосвязи характеристик циклонической активности с индексами атмосферной циркуляции. Анализ взаимосвязи между ежегодными значениями индекса CAI и значениями индекса NAO показывает, что в районе Исландского минимума максимальная циклоническая активность в зимнюю половину года отмечается в годы с положительными значениями индекса NAO, более того отмечается тенденция к росту значений индекса CAI по мере увеличения значения индекса NAO (рис. 4). В районе Средиземного моря наблюдается обратная тенденция – максимальная циклоническая активность наблюдается в

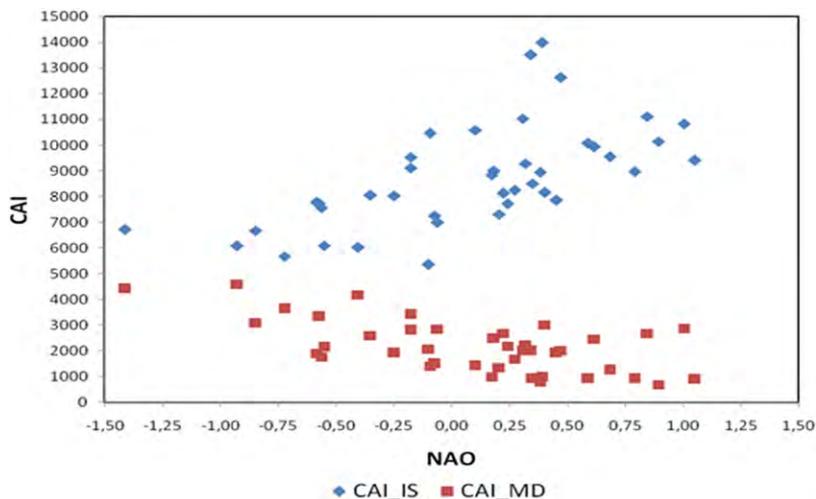


Рис. 4. Взаимосвязь между ежегодными значениями индекса CAI, рассчитанными для регионов Исландского минимума (синие квадраты) и Средиземного моря (красные квадраты), и значениями индекса NAO для зимней половины года за период с 1979/1980 по 2019/2020 гг.

годы с максимальными отрицательными значениями индекса NAO и её ослабление – по мере роста значения индекса NAO. Коэффициенты линейной корреляции между CAI и индексом NAO, рассчитанные для районов Исландского минимума, Баренцева и Средиземного морей, составляют, соответственно, 0,62, 0,56 и -0,48. Указанные значения коэффициентов линейной корреляции получены при уровне значимости 0,001.

Заключение

Межгодовая изменчивость циклонической активности в выделенных районах Северной Атлантики в значительной степени обусловлена колебаниями крупномасштабной циркуляции – северо-атлантическим и восточно-атлантическим колебаниями. Анализ пространственного распределения параметров циклонической активности в годы развития САК и ВАК позволяет сделать следующие выводы. Северо-атлантическое колебание оказывает значительное влияние на активность циклонов в зимний сезон, прежде всего, в районе Исландского минимума, а также в субполярных районах Атлантики, в том числе в районе Баренцева моря. Усиление активности циклонов в этих районах наблюдается именно в годы развития интенсивной положительной фазы САК. Максимальное усиление циклонической активности в этих районах наблюдается в годы совпадения положительных фаз САК и ВАК, в эти же годы отмечается максимальное ослабление активности средиземноморских циклонов. В годы развития положительной фазы ВАК на фоне отрицательной фазы САК интенсификация циклонов наблюдается на восточной акватории океана и на Европейском континенте. При этом усиление активности циклонов в Европе может отмечаться как в умеренных, так и южных широтах. Значительное усиление циклонической активности в средиземноморском регионе в зимний сезон 2009/2010 гг. и её ослабление в районах Исландского минимума и Баренцева моря отмечено именно при интенсивных отрицательных значениях индекса NAO и интенсивных положительных значениях индекса EA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Viazilova N.A., Viazilov A.E.* On climatology of storm cyclones entering European region of Russia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 611. N 1.
2. *Hurrell J.W.* Climate Variability: North Atlantic and Arctic Oscillation // Encyclopedia of Atmospheric Sciences. 2003. P. 439–445.
3. *Loptien U., Ruprecht E.* Effect of Synoptic Systems on the Variability of the North Atlantic Oscillation // Mon. Wea. Rev. 2005. V. 133, N 10. P. 2894–2904.
4. *Бардин М.Ю., Полонский А.Б.* Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, N 2. С. 147–157.
5. *Нестеров Е.С.* О фазах североатлантического колебания // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 64–74.
6. *Нестеров Е.С.* О восточно-атлантическом колебании циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. 2009. № 12. С. 32–40.
7. *Franzke C., Feldstein S.B.* The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62, N 9. P. 3250–3267.
8. *Hersbach et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. of the Royal Meteorol. Soc. 2020. V. 146, Is. 730. P. 1999–2049.
9. *Акперов М.Г., Мохов И.И.* Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 5. С. 620–637.

УДК 551.465

СОЛЁНОСТНЫЙ РЕЖИМ ЧЁРНОГО МОРЯ В ПОСЛЕДНИЕ ПЯТЬ ЛЕТ

**А.А. Воронцов¹, С.А. Баталкина²,
А.М. Булыгин³, Г.И. Нефёдова⁴**

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
¹ av10921@meteo.ru, ² slim@meteo.ru,
³ bam524@mail.ru, ⁴ gin@meteo.ru*

Введение

В последнее время тёплые зимы в регионе Чёрного моря де-факто становятся нормой. Глобальное потепление климата, перестройка атмосферной циркуляции, что сопровождается изменениями как режима ветра, так и осадков, ведут к изменению процессов формирования халинной (солёностной) структуры моря, в первую очередь – его деятельного слоя.

В целом поля солёности в Чёрном море формируются за счёт пресных речных вод (сток рек Днепр, Южный Буг, Дунай и др.), притоком солёных мраморно-морских вод через Босфор, притоком более пресных азово-морских вод через Керченский пролив, а также вертикальным в толще вод обменом (влияние вихрей, турбулентности и волнения) [1].

Средняя солёность в верхнем деятельном слое составляет 17–18 ‰. В толще вод – порядка 22 ‰ [2]. Характерный для Чёрного моря профиль солёности показан на рис. 1.

Для вертикального распределения солёности в толще вод Чёрного моря присуще наличие двух галоклинов: квазисезонного галоклина в верхнем слое 0–30 м и постоянного галоклина в слое 50–100 м [3].

Поскольку в последнее время усилилась тенденция в изменении различных гидрологических параметров, было принято решение рассмотреть и изменение характеристик солёностного режима. Для сравнения были взяты климатические нормы

солёности за 1981–2010 и 1991–2020 гг. и оценки средних значений солёности морской воды за последние пять лет.

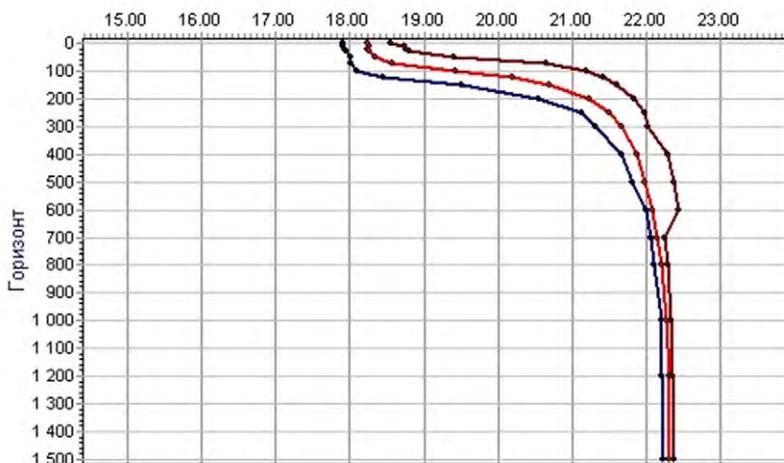


Рис. 1. Характерный климатический профиль солёности в Чёрном море (среднее значение показано красным цветом, максимальное – коричневым, минимальное – синим)

Исходные данные

В настоящей работе использованы данные наблюдений на прибрежных гидрометеорологических станциях Чёрного моря (Черноморское, Евпатория, Ялта, Феодосия, Новороссийск, Геленджик, Сочи) за 1981–2022 гг. и экспедиционные данные океанографических наблюдений на судах в открытом море за тот же период.

Карты освещённости данными океанографических экспедиционных наблюдений за солёностью морской воды в Чёрном море за различные периоды (климатический и последние пять лет), которые были использованы для проведения расчётов по акватории Чёрного моря, показаны, соответственно, на рис. 2 и 3.

Для рассмотрения тенденции изменения солёности воды в Чёрном море были взяты средние значения солёности в одноградусных трапециях Марсдена, рассчитанные за три периода: 1981–2010, 1991–2020 гг. и за пять последних лет.

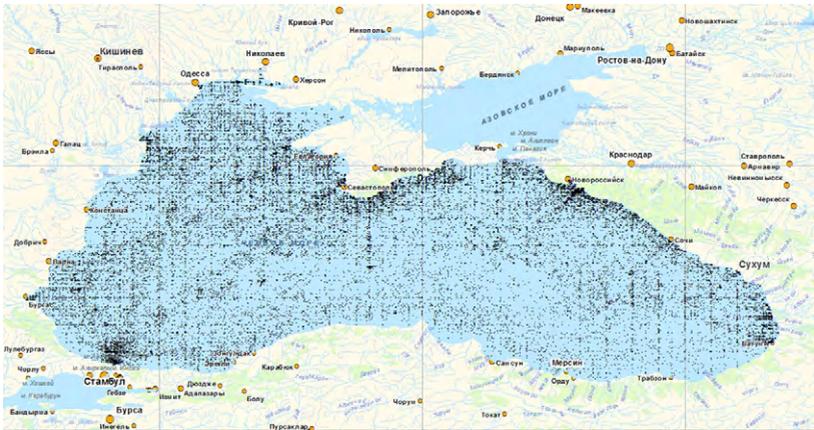


Рис. 2. Схема расположения станций, по данным которых рассчитаны климатические характеристики солёности морской воды

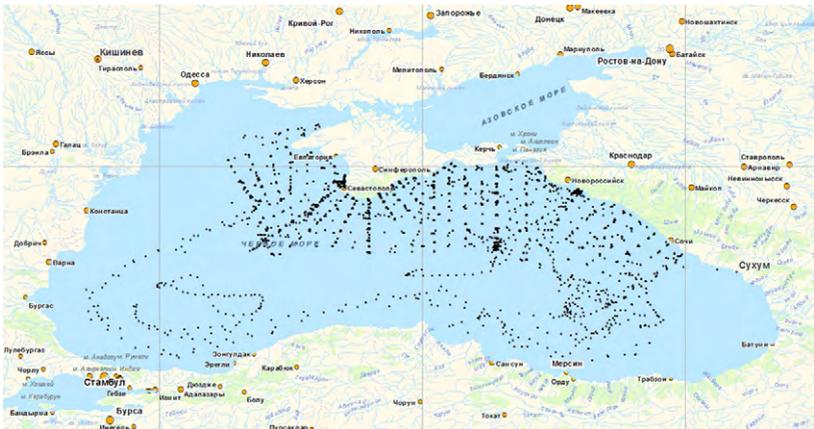


Рис. 3. Схема расположения станций, по данным которых рассчитаны режимные характеристики плотности морской воды за последние пять лет

Оценка климатических значений солёности была выполнена по океанографическим данным, причём данные не подвергались никакой фильтрации или сглаживанию, просто были получены средние значения для всех наблюдений, выполненных в каждой

трапеции Марсдена для каждого месяца. Данные за период до 2020 года представлены практически во всех одноградусных квадратах, однако распределение данных наблюдений во времени неравномерно.

Максимальное количество данных наблюдений приходится на конец прошлого столетия. Общее количество измеренных в квадрате вертикальных профилей солёности воды, как правило, составляет несколько сотен, в отдельных квадратах – несколько тысяч значений. Отметим, что западная часть Чёрного моря лучше представлена данными наблюдений по сравнению с восточной.

Режим солёности в Чёрном море

Для распределения солёности по акватории моря характерно наличие двух максимумов вертикальных градиентов солёности [4].

Первый из них находится в поверхностном слое моря 0–30 м. За его формирование отвечает сток рек, а также процессы перемешивания воды в верхнем квазиоднородном слое (ВКС).

Второй максимум вертикального градиента солёности – постоянный галоклин – поддерживается осенне-зимней конвекцией, выравнивающей распределение солёности в ВКС.

Положение изогалин в поверхностном слое определяется мощными источниками опреснения: стоком рек Дуная, Днепра, Днестра, Буга, впадающих в северо-западную часть моря; реками Кавказского побережья; водами Азовского моря, поступающими через Керченский пролив.

В соответствии с общей схемой циркуляции распреснённые воды движутся вдоль побережья. Минимальная солёность наблюдается на Дунайском устьевом взморье. Здесь постоянно присутствуют воды с солёностью 13 ‰. По мере удаления от устьев речная вода быстро трансформируется. Горизонтальные градиенты солёности уменьшаются в направлении нормали от побережья. Рост солёности от изогалины 18 ‰ до центров западной и восточной частей моря не превышает 0,5 ‰.

В восточной части моря распреснение поверхностных вод менее интенсивно. Средняя месячная солёность воды на устьевых

взморьях рек Ингури и Риони удерживаются на уровне 14–17 ‰. Тем не менее, изогалина 18 ‰ в этом районе удалена от побережья примерно на такое же расстояние, как и на северо-западе. Это происходит в результате действия квазистационарного антициклонического круговорота, увлекающего южно-кавказские прибрежные воды к Анатолийскому побережью. Распространяясь до 40 ° в.д., они поворачивают на север и смешиваются с водами, поступающими вдоль Анатолии с запада.

Солоноватые воды Азовского моря не создают таких резких горизонтальных градиентов солёности, как речные воды, но достаточно ярко прослеживаются в поле солёности у Керченского пролива в летний период. Выйдя из пролива, они смешиваются с кавказскими прибрежными водами и увлекаются на запад основным циклоническим круговоротом.

Сезонные различия поля солёности в поверхностном слое носят в основном количественный характер. Максимальное солесодержание поверхностного слоя наблюдается во второй половине гидрологической зимы, т.е. в феврале-марте. Связано это с интенсификацией процессов конвективного и ветрового перемешивания. В центрах западного и восточного циклонических круговоротов наблюдаются устойчивые области с солёностью 18,4 ‰.

Интенсивная трансформация речных вод, сопровождаемая сезонным увеличением стока, обуславливает весной максимальные горизонтальные градиенты халинного фронта, оконтуривающего дунайское устьевое взморье.

Карта среднемноголетнего распределения солёности поверхностного слоя вод Чёрного моря в зимний период показана на рис. 4.

В июне наблюдается минимум солёности в районе, прилегающем к Керченскому проливу, с характерным значением 16,4 ‰.

В целом летний период характерен сглаживанием поля солёности. Волна опреснения смещается от берегов в мористые области. При этом с августа по сентябрь солёность вод северо-западной части моря на поверхности везде меньше 18 ‰.

С октября воды поверхностного слоя осолоняются на всей акватории моря.

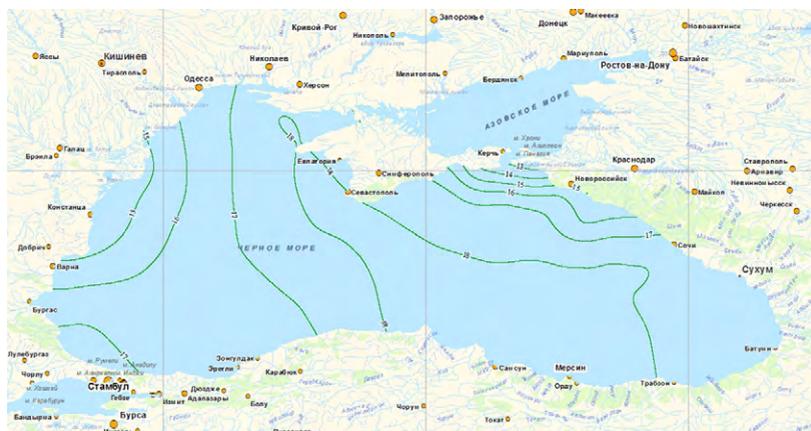


Рис. 4. Распределение солёности (‰) вод по акватории Чёрного моря в зимний период

Интенсивность сезонных колебаний солёности в различных районах моря определяется близостью к источнику распреснения с учётом влияния переноса вод циклонической циркуляцией.

В соответствии с основными источниками распреснения локализуются три максимума размаха: дунайское устьевое взморье – более 3 ‰ в течение года, в восточной части моря у устьевых взморья рек Риони и Ингури – 2–3 ‰, в районе Керченского пролива – до 1,5 ‰ в течение года.

Значительное уменьшение сезонной изменчивости солёности вод (менее 0,5 ‰) происходит в районах мористее квазистационарных халинных фронтов. Минимум – 0,20–0,25 ‰ – наблюдается в районе Анатолийского побережья, в районе наименее подверженном влиянию основных источников распреснения (рис. 5).

В открытом море для распределения солёности вод по вертикали характерна некоторая «куполообразность» залегания изохалинных поверхностей, которая прослеживается до глубины 1000 м. В центре моря на меридиане 35° в.д. изохалинные поверхности заглубляются. Такая пространственная структура качественно устойчива в пределах всего годового цикла.

В целом количественные изменения солёности вод Чёрного моря зависят от бюджета пресных и солёных вод, интенсивности



Рис. 5. Распределение солёности (‰) вод Чёрного моря летом

вертикального турбулентного обмена и циклонической циркуляции. По мере удаления от поверхности моря происходит изменение относительной роли перечисленных факторов. Так, если в ВКС основным фактором является речной сток (баланс пресных вод), то на глубине на сезонные изменения солёности существенно влияет вертикальный турбулентный обмен.

Однако, если говорить об изменчивости солёности за последние годы, то следует отметить, что в центральных частях западной, центральной и восточной областей моря тренд солёности за последние годы положительный.

Естественно, солёность, по сравнению с температурой воды, является более «консервативной» характеристикой, и амплитуда её изменчивости много меньше амплитуды изменчивости температуры. При этом пространственная изменчивость солёности во многом определяется сформировавшимися трёхмерными полями течений. Именно течения перераспределяют по акватории моря, трансформируют сформированные стоком рек или локальным атмосферным воздействием поля солёности.

В прибрежной зоне прослеживается такая же тенденция, что и в открытом море.

Графики изменения среднегодовых значений солёности воды на прибрежных гидрометеорологических станциях Евпатория и

Новороссийск за последние годы и линейного тренда представлены на рис. 6 и 7.

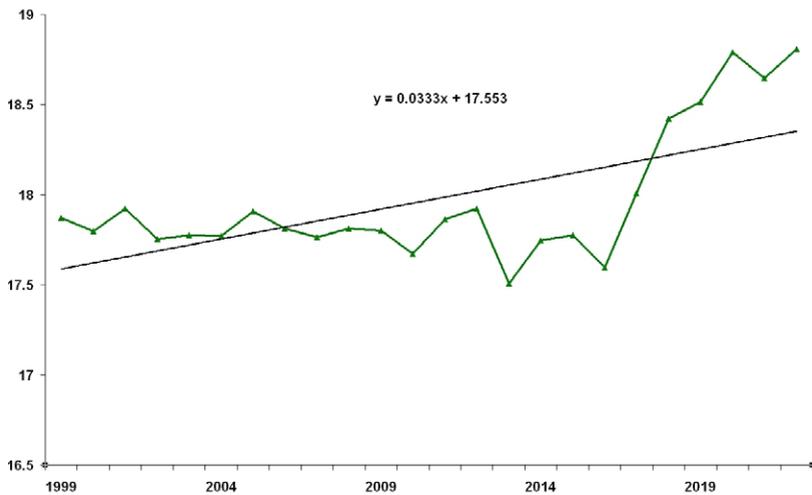


Рис. 6. Изменчивость солёности (%) в районе гидрометеорологической станции Евпатория

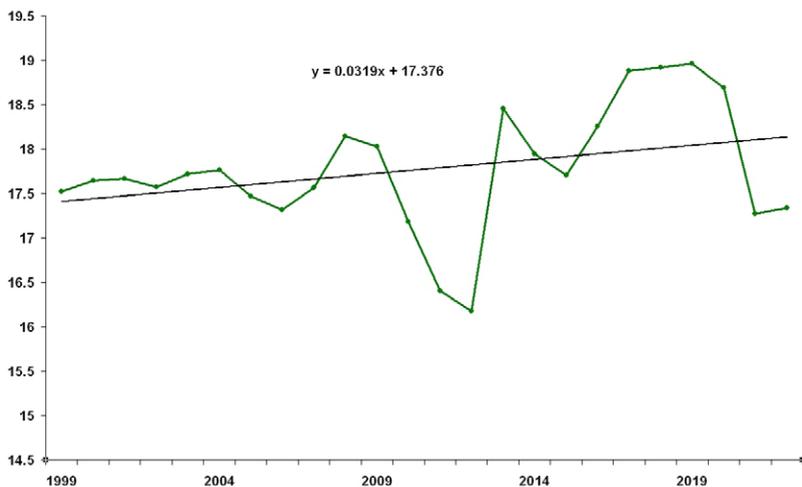


Рис. 7. Изменчивость солёности (%) в районе станции Новороссийск

Отметим, что тренд изменения солёности на всех морских прибрежных станциях и постах российской зоны Чёрного моря положительный.

Характеристики тенденции изменения режима солёности в прибрежной зоне Чёрного моря показывают характерный положительный тренд.

Для иллюстрации положительного тренда в режиме солёности морской воды в прибрежной зоне Чёрного моря в таблице приведены средние оценки солёности за последние пять лет по сравнению с тридцатилетними климатическими оценками за принятый в последнее время современный климатический период 1001–2020 гг.

Т а б л и ц а

Характеристики среднегодового увеличения солёности ΔS ‰ по данным гидрометеорологических станций побережья Чёрного моря за различные периоды

ГМС	1991–2020	2019–2022	ΔS ‰
Черноморское	17,827	18,109	0,282
Евпатория	17,866	18,686	0,820
Ялта	17,779	18,397	0,618
Феодосия	17,143	19,629	2,186
Новороссийск	17,831	18,114	0,293
Геленджик	17,786	17,872	0,086
Туапсе	16,501	16,946	0,445
Сочи	16,625	16,838	0,213

Заключение

По итогам рассмотрения изменения солёностного режима Чёрного моря по данным прибрежных гидрометеорологических станций и экспедиционных океанографических данных открытого моря можно уверенно констатировать, что солёность увеличивается.

Сравнения средних оценок поля солёности за климатические периоды 1981–2010, 1991–2020 гг. и данных последнего пятилетия подтверждают факт положительного тренда. Похоже, потепление климата проявляется не только в температурах воздуха и воды, но и в других характеристиках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 146 с.
2. *Белокопытов В.Н.* Климатические изменения гидрологического режима Чёрного моря: дис. на соискание учёной степени д-ра геогр. наук. Севастополь: МГИ, 2017. 377 с.
3. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Чёрного моря. Севастополь: МГИ, 2011. 211 с.
4. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV: Чёрное море.* Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 429 с.
5. *Ильин Ю.П. и др. / Ю.П. Ильин, Л.Н. Репетин, В.Н. Белокопытов, Ю.Н. Горячкин, Н.Н. Дьяков, А.А. Кубряков, С.В. Станичный.* Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2: Чёрное море. Севастополь: УкрНИГМИ, 2012. 421 с.

УДК 551.465

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ЧЁРНОГО МОРЯ

А.А. Воронцов¹, С.А. Баталкина², Г.И. Нефёдова³

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,*

¹ av10921@meteo.ru, ² slim@meteo.ru, ³ gin@meteo.ru

Введение

Потепление климата – это основная тенденция его изменений на протяжении последних десятилетий. Температура воды на акватории Чёрного моря также демонстрирует уверенный рост, о чём свидетельствуют данные наблюдений на гидрометеорологических станциях, на океанографических судах и по данным попутных судовых измерений. Климатические показатели [1] для температуры воды и воздуха приведены ниже в табл. 1.

Таблица 1

**Климатические характеристики температуры воды и воздуха
по Чёрному морю, °С**

Месяц	Средняя температура воды	Средняя температура воздуха
Январь	9,3	4,6
Февраль	8,1	5,9
Март	8,2	7,9
Апрель	10,3	11,6
Май	16,1	16,5
Июнь	21,7	22,1
Июль	24,9	24,6
Август	25,8	24,8
Сентябрь	23,3	20,7
Октябрь	19,0	14,9
Ноябрь	15,0	10,1
Декабрь	11,6	6,8
Год	17,85	18,31

Термический режим деятельного слоя моря определяется взаимодействием с атмосферой, тепловым балансом, ветровым и конвективным перемешиванием вод. Более 80 % солнечной радиации, поглощённой океаном, накапливается в верхнем 0–30 м слое, а поглощение солнечной радиации сводится главным образом к преобразованию радиационной энергии в тепло.

В данной работе сделана попытка на основе данных наблюдений в последние годы оценить изменчивость поля температуры воды по всей акватории Чёрного моря: куда всё ещё направлен вектор климатического потепления; велик ли тренд температуры воды как в прибрежных районах, так и на акватории всего моря? Естественно, данные по прибрежной зоне доступны только в российском секторе Чёрного моря, а в открытом море данные охватывают всю акваторию.

Исходные данные

Для выполнения настоящей работы были использованы данные наблюдений на прибрежных гидрометеорологических станциях (ГМС) Чёрного моря (Черноморское, Евпатория, Ялта, Феодосия, Новороссийск, Геленджик, Сочи) за 1977–2022 гг., а также экспедиционные данные океанографических наблюдений на судах в открытом море и данные гидрометеорологических наблюдений штурманским составом за тот же период.

Для оценки изменчивости поля температуры воды для акватории Чёрного моря были посчитаны нормы в одноградусных трапециях Марсдена для современного климатического периода и за последние пять лет. Дополнительно были оценены аномалии и получены экстремумы температуры воды в одноградусных трапециях Марсдена.

По данным гидрометеорологических станций были получены такие же оценки.

Отметим, что все вышеуказанные оценки были получены в соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (ВМО) по климатическому обслуживанию [2].

Изменчивость температуры воды

По многолетним данным температура воды на поверхности Чёрного моря порядка 17 °С.

В разных частях акватории Чёрного моря характеристики температуры воды по многолетним данным [3] незначительно отличаются (табл. 2)

Таблица 2

Экстремумы температуры воды (°С) в различных районах Чёрного моря (российский сектор)

Оценка	Северо-запад	Северо-восток
Среднее	15,1	15,7
Минимум	-2,0	-1,0
Максимум	35,0	35,0

Зимой изменения температуры воды на акватории моря носят зональный характер (рис. 1), в самом холодном месяце (феврале) в открытом море среднегодовая температура воды изменяется от 3,5 до 8,5 °С.

Летом происходит повышение температуры воды на поверхности моря (рис. 2) до 23–25 °С.



Рис. 1. Распределение температуры воды, °С, на поверхности Чёрного моря зимой за многолетний период



Рис. 2. Распределение температуры воды, °С, на поверхности Чёрного моря летом за многолетний период

В тёплый период изменение температуры воды на акватории моря носит меридиональный характер и повышается с северо-запада на юго-восток.

Изменчивость поля температуры воды летом не так резко выражена по сравнению с зимним периодом [3]. Летом температура воды в поверхностном слое изменяется более плавно, чем зимой.

Изменение температуры воды по вертикали для большей части года характеризуется её наибольшими величинами на поверхности, некоторым понижением до горизонтов 60–75 м, откуда она очень медленно повышается с глубиной. На горизонтах 75–100 м располагается холодный промежуточный слой, вода которого в течение всего года обычно имеет температуру 7–8 °С в открытых районах моря [4].

Зимой температура воды порядка 5–6 °С охватывает слой толщиной до 50 м, далее идёт повышение к горизонтам в 75–100 м к промежуточному слою (проявление летнего прогрева вод). Далее с глубиной температура несколько понижается до горизонта 150 м, далее стабилизируется, оставаясь при этих значениях.

Летом тёплая вода охватывает слой около 50 м, далее с глубиной идёт плавное понижение температуры до горизонта

150 м, где она стабилизируется до практически постоянных внутригодовых значений.

В прибрежной зоне Чёрного моря (характеристики температуры воды приведены для удобства подготовки материала отдельно для побережья Крыма – табл. 3 и для побережья Краснодарского края – табл. 4) зимой температура воды меняется от 9 до 13 °С, летом – от 18 до 25 °С, достигая при этом температур порядка 30 °С.

Таблица 3

Температура воды (°С) по крымским гидрометеорологическим станциям Чёрного моря за многолетний период

Наименование	Месяц	Среднее	Максимум	Дата максимума
Черноморское	1	4,01	10,5	01.01.2018
	2	3,61	11	17.02.2016
	3	5,24	11	28.03.2016
	4	9,64	16	30.04.2015
	5	15,02	28,1	21.05.1995
	6	20,73	27,1	29.06.2017
	7	23,3	29	30.07.2015
	8	23,5	28,5	12.08.2014
	9	20,62	26,8	05.09.2015
	10	15,76	22,8	01.10.1994
	11	10,49	18,9	01.11.2020
	12	6,25	13,3	01.12.2020
Ялта	1	8,98	12,5	08.01.2021
	2	8,03	11,3	04.02.2021
	3	8,18	11,4	27.03.2014
	4	10,01	18,3	27.04.2018
	5	14,61	24,2	31.05.2007
	6	19,31	27,4	25.06.2012
	7	22,71	28,5	28.07.2001
	8	24,49	29,6	13.08.2010
	9	21,46	27	06.09.2007
	10	17,97	24,3	01.10.2015
	11	13,73	20,2	01.11.2020
	12	10,75	15,4	01.12.2009

Окончание табл. 3

Наименование	Месяц	Среднее	Максимум	Дата максимума
Феодосия	1	6,17	12,1	07.01.2001
	2	5,66	9,9	02.02.2021
	3	6,61	11,4	26.03.2014
	4	9,73	17,8	29.04.2012
	5	14,2	22,9	30.05.2005
	6	18,3	27	29.06.2016
	7	21,68	28,8	28.07.2014
	8	23,62	30	15.08.2010
	9	20,33	26,4	02.09.2010
	10	16,3	22,6	09.10.1994
	11	11,36	18,7	01.11.2020
	12	7,8	13,5	01.12.2005

Таблица 4

**Температура воды (°С) по гидрометеорологическим станциям
Чёрного моря Краснодарского побережья за многолетний период**

Наименование	Месяц	Среднее	Максимум	Дата максимума
Анапа	1	7,18	12,5	06.01.2001
	2	6,45	11,2	04.02.2021
	3	7,77	12,0	25.03.2014
	4	10,74	18,2	28.04.2018
	5	15,47	24,2	31.05.2007
	6	20,73	26,7	26.06.2019
	7	23,66	30,5	29.07.2001
	8	24,53	30,0	08.08.2010
	9	21,54	27,4	07.09.2007
	10	17,12	24,0	05.10.1994
	11	12,51	19,0	06.11.2012
	12	9,16	15,5	02.12.2012
Геленджик	1	8,61	13,2	01.01.2021
	2	7,86	13,0	27.02.2015
	3	8,75	14,0	25.03.2014
	4	11,49	18,4	27.04.2018
	5	16,43	25,2	31.05.2007
	6	21,53	28,4	25.06.2009

Окончание табл. 4

Наименование	Месяц	Среднее	Максимум	Дата максимума
	7	24,46	30,2	31.07.2001
	8	25,36	30,5	14.08.2010
	9	22,58	28,8	03.09.1982
	10	18,58	25,1	01.10.2015
	11	14,16	20,0	01.11.2006
	12	10,67	16,0	04.12.2012
Сочи	1	9,79	13,2	01.01.2011
	2	9,00	12,8	11.02.2021
	3	9,32	13,6	31.03.2020
	4	11,41	18,4	29.04.2000
	5	15,63	23,8	25.05.2015
	6	20,41	28,8	26.06.2019
	7	24,44	29,5	31.07.2001
	8	25,84	30,1	13.08.2010
	9	23,64	28,9	01.09.2010
	10	19,82	25,2	01.10.2020
	11	15,34	20,3	02.11.2012
	12	11,83	18,0	09.12.2013

Для сравнения изменчивости температуры воды были получены оценки температуры воды за различные современные климатические периоды.

Изменение средних характеристик температуры воды на прибрежных станциях российского сектора Чёрного моря за климатический период 1991–2020 гг., по сравнению с климатическим периодом 1981–2010 гг., в зимний период составляет от 0,29 до 1,59 °С (табл. 5). И эта положительная тенденция усиливается: средняя температура за последние пять лет выросла, по сравнению с нормой, в пределах от 1,06 до 2,43 °С

В летний период также подтверждается положительная тенденция: за климатический период 1991–2020 гг., по сравнению с климатическим периодом 1981–2010 гг., в зимний период составляет от 0,52 до 1,64 °С (табл. 6). В последние пять лет также наблюдается повышение средней температуры воды в пределах 0,52–0,92 °С.

Таблица 5

**Средние характеристики температуры воды (T_w) на ГМС
за последние десятилетия в зимний период**

ГМС	Средняя T_w , °С, за 1981–2010 гг.	Средняя T_w , °С, за 1991–2020 гг.	Средняя T_w , °С, за последние годы
Черноморское	3,81	5,40	7,83
Евпатория	5,59	5,93	7,55
Ялта	9,09	9,51	10,66
Феодосия	6,42	6,74	8,04
Анапа	7,34	7,84	9,33
Геленджик	8,89	9,31	10,59
Сочи	10,07	10,38	11,29

Таблица 6

**Средние характеристики температуры воды на ГМС
за последние десятилетия в летний период**

ГМС	Средняя T_w , °С, за 1981–2010 гг.	Средняя T_w , °С, за 1991–2020 гг.	Средняя T_w , °С, за 2018–2022 гг.
Черноморское	22,22	23,10	23,83
Евпатория	21,70	22,32	22,91
Ялта	21,90	22,75	23,50
Феодосия	20,95	21,78	22,70
Анапа	22,61	23,39	24,04
Геленджик	23,55	24,17	25,02
Сочи	23,33	24,02	24,94

Изменчивость температуры воды в прибрежной зоне Чёрного моря характеризуется её квазипостоянным повышением (рис. 3 и 4). Отметим, что на всех станциях наблюдался положительный тренд температуры воды [5].

По полученным оценкам температуры воды в прибрежной зоне и в открытом море можно уверенно констатировать, что потепление климата как проявляющаяся тенденция на протяжении последних десятилетий явно присутствует в различных параметрах, в частности в данных по температуре морской воды на акватории Чёрного моря. И положительный тренд температуры морской воды также подтверждает это положение.

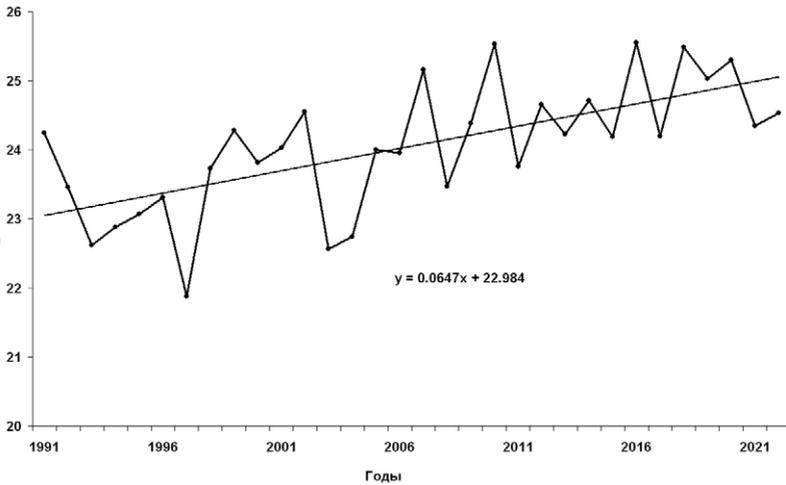


Рис. 3. Изменение и линейный тренд температуры воды, °С, по данным ГМС Сочи в последние годы

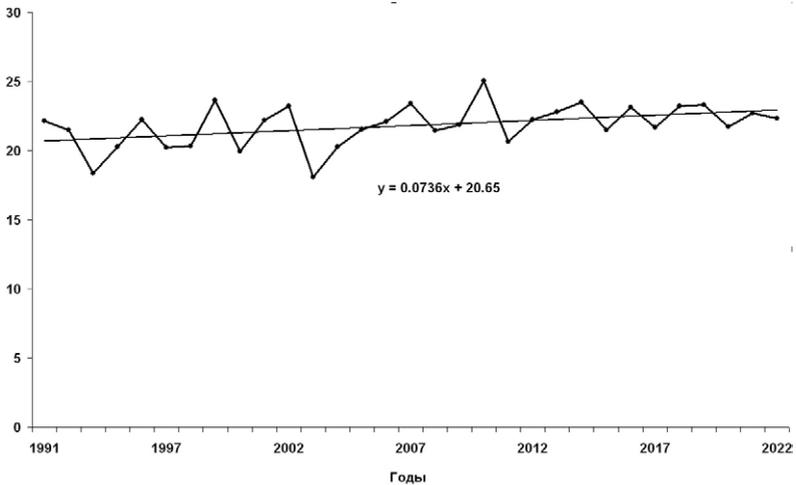


Рис. 4. Изменение и линейный тренд температуры воды, °С, по данным ГМС Феодосия в последние годы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Чёрного моря. Севастополь: МГИ, 2011. 211 с.
2. *Руководящие указания ВМО по расчёту климатических норм // ВМО.* 2017. № 1203. 32 с.
3. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 146 с.
4. *Белокопытов В.Н.* Климатические изменения гидрологического режима Чёрного моря: дис. на соискание учёной степени д-ра геогр. наук. Севастополь: МГИ, 2017. 377 с.
5. *Грузинов В.М. и др. / В.М. Грузинов, А.М. Булыгин, С.А. Баталкина, Г.И. Нефёдова, А.А. Воронцов, А.В. Григорьев, Н.Н. Дьяков, И.М. Кабатченко, А.Е. Липченко, Ю.А. Мальченко, А.В. Холопцев, И.В. Мезенцева, Т.Н. Копейкина // Бюллетень гидрометеорологического состояния Чёрного моря в 2020 году.* Обнинск: Артифекс, 2021. 877 с.

УДК 551.465

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ ЧЁРНОГО МОРЯ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

А.А. Воронцов¹, Г.И. Нефёдова², С.А. Баталкина³

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,*

¹ av10921@meteo.ru, ² gin@meteo.ru, ³ slim@meteo.ru

Введение

Среди различных направлений исследования климата всё чаще встречается рассмотрение проблематики климатических изменений в морской среде, в том числе в Чёрном море. Тёплые зимы на Чёрном море уже становятся новой климатической нормой, и глобальное потепление климата привело к изменению основных процессов формирования и непосредственно самих характеристик термохалинной структуры моря.

В [1] отмечено значительное увеличение в последнее десятилетие как температуры, так и солёности в деятельном слое моря.

Отметим, что большая часть публикаций по океанографии Чёрного моря посвящена в основном температуре и солёности морской воды, а такая важная физическая характеристика как плотность морской воды, которая влияет на вертикальный обмен и непосредственно на циркуляцию вод моря, намного меньше занимает внимание авторов.

Цель настоящей статьи – попытаться заполнить некоторый пробел в знаниях общих закономерностей климатической изменчивости плотности воды в деятельном слое Чёрного моря в современный климатический период.

Общие характеристики плотности вод Чёрного моря

Любое вещество определяется рядом характеристик, в том числе его плотностью (масса вещества в единице его объёма, кг/м³). Плотность воды – это функция температуры, солёности и давления.

Измерение плотности морской воды практически возможно только в лабораторных условиях, поэтому плотность воды вычисляют по формулам, в зависимости от температуры и солёности воды, и давления, используя приближённое уравнение состояния, либо по формулам Чена и Миллера [2], либо по формулам, основанным на Международном уравнении состояния морской воды [3].

В зависимости от температуры и солёности плотность воды в Чёрном море значительно изменяется как во времени, так и в пространстве. В верхних слоях весной и летом она уменьшается. В центральных районах моря средняя плотность воды в поверхностном слое близка к $1012,3 \text{ кг/м}^3$, на максимальных глубинах она достигает $1017,3 \text{ кг/м}^3$.

В прибрежных опреснённых районах Чёрного моря плотность уменьшается, её среднее значение примерно $1011,5 \text{ кг/м}^3$, иногда летом вблизи устьев рек она меньше 1.

Характеристика плотности морской воды по всей акватории Чёрного моря, за исключением прибрежных районов моря, по данным [4, 5] приведена в табл. 1.

Таблица 1

Температура воды (°C) по крымским гидрометеорологическим станциям Чёрного моря за многолетний период

Сезон	Среднее значение, кг/м^3	Минимум, кг/м^3	Максимум, кг/м^3
Зима	1011	1010	1017
Лето	1013	1011	1017

Исходные материалы

Нами был проведён анализ данных натурных наблюдений за многолетний период (взят современный климатический период 1991–2020 гг.) и за последние пять лет.

В работе использованы данные океанографических наблюдений (температура T_w и солёность морской воды S) на исследовательских судах МГИ и ИНБЮМ (учреждения РАН) за последнее тридцатилетие на всей акватории Чёрного моря.

Помимо данных наблюдений на акватории моря в работе использованы данные наблюдений (T_w и S) на гидрометеорологических

станциях российского побережья Черноморское, Евпатория, Ялта, Феодосия, Новороссийск, Геленджик, Туапсе, Сочи за период с 1991 года по настоящее время.

Карты освещённости данными океанографических экспедиционных наблюдений за температурой и солёностью морской воды в Чёрном море в слое 0–200 м за различные периоды (1991–2020 и 2018–2022 гг.), которые были использованы для проведения расчётов плотности морской воды по акватории моря, показаны, соответственно, на рис. 1 и 2.

Тенденции изменчивости плотности морской воды

В прибрежных районах российского сектора Чёрного моря в последние пять лет наблюдаются различные проявления поведения плотности.

На крымском побережье наблюдаются положительные тенденции (на рис. 3 приведён пример характерного вида временной изменчивости среднегодовой условной плотности в прибрежной зоне в районе станции Евпатория).

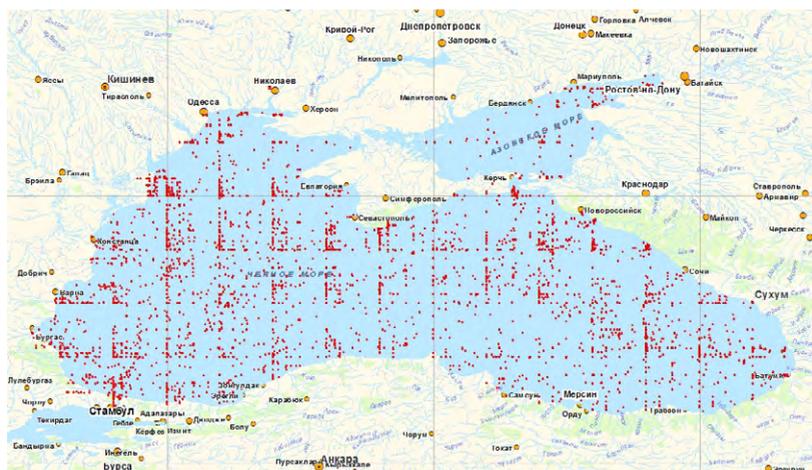


Рис. 1. Схема расположения океанографических станций, по данным которых рассчитаны климатические характеристики плотности морской воды за последние пять лет

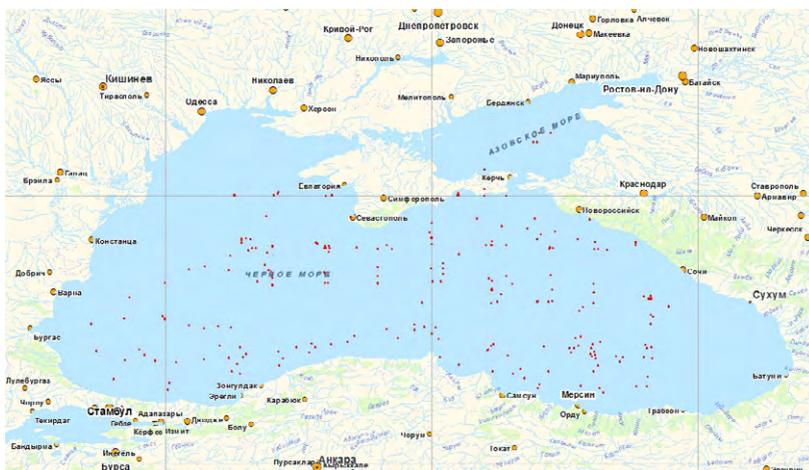


Рис. 2. Схема расположения станций, по данным которых рассчитаны режимные характеристики плотности морской воды за последние пять лет

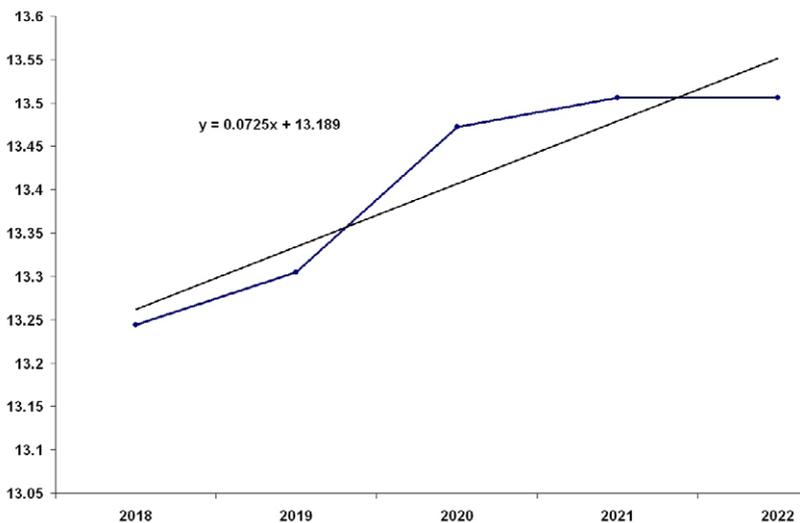


Рис. 3. Изменчивость и тенденции условной плотности морской воды по данным ГМС Евпатория

На кавказском побережье российского сектора Чёрного моря прослеживаются отрицательные тенденции изменений плотности морской воды.

На рис. 4 приведён пример характерного вида временной изменчивости среднегодовой условной плотности в прибрежной зоне в районе гидрометеорологической станции Туапсе в последнее пятилетие – от 2018 до 2022 года.

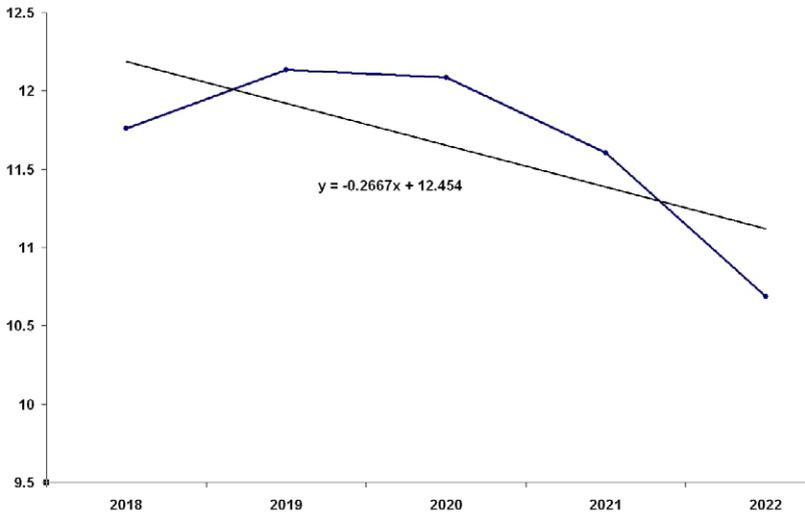


Рис. 4. Изменчивость и тенденции условной плотности морской воды по данным ГМС Туапсе

И, если для температуры и солёности морской воды характерно повышение среднегодовых значений в последние годы в прибрежной зоне (в последней колонке табл. 2–4 показаны разности характеристик за климатический и современный периоды), то для плотности морской воды присущи изменения разных знаков, как повышение, так и понижение годовых значений.

В прибрежных районах годовой ход плотности морской воды незначителен (рис. 5) в отличие от характерного вида годового хода температуры воды. Отметим, что для солёности годовой ход практически незначителен.

Таблица 2

**Характеристики температуры морской воды в прибрежной зоне
российского сектора Чёрного моря**

ГМС	1991–2020	2019–2022	ΔT °C
Черноморское	14,003	15,185	-1,182
Евпатория	13,971	14,978	-1,005
Ялта	15,362	16,309	-0,947
Феодосия	13,846	14,757	-0,911
Новороссийск	15,754	16,901	-1,147
Геленджик	16,174	17,418	-1,244
Туапсе	16,182	17,284	-1,102
Сочи	16,601	17,810	-1,209

Таблица 3

**Характеристики температуры морской воды в прибрежной зоне
российского сектора Чёрного моря**

ГМС	1991–2020	2019–2022	ΔS ‰
Черноморское	17,827	18,109	-0,282
Евпатория	17,866	18,686	-0,820
Ялта	17,779	18,397	-0,618
Феодосия	17,143	19,629	-2,186
Новороссийск	17,831	18,114	-0,293
Геленджик	17,786	17,872	-0,086
Туапсе	16,501	16,946	-0,445
Сочи	16,625	16,838	-0,213

Таблица 4

**Характеристики условной плотности морской воды в прибрежной зоне
российского сектора Чёрного моря**

ГМС	1991–2020	2019–2022	$\Delta \rho$
Черноморское	12,964	12,964	0,000
Евпатория	13,000	13,445	-0,445
Ялта	12,677	12,964	-0,297
Феодосия	12,467	14,210	-1,843
Новороссийск	12,642	12,627	0,015
Геленджик	12,524	12,334	0,190
Туапсе	11,541	11,657	-0,116
Сочи	11,552	11,463	0,089

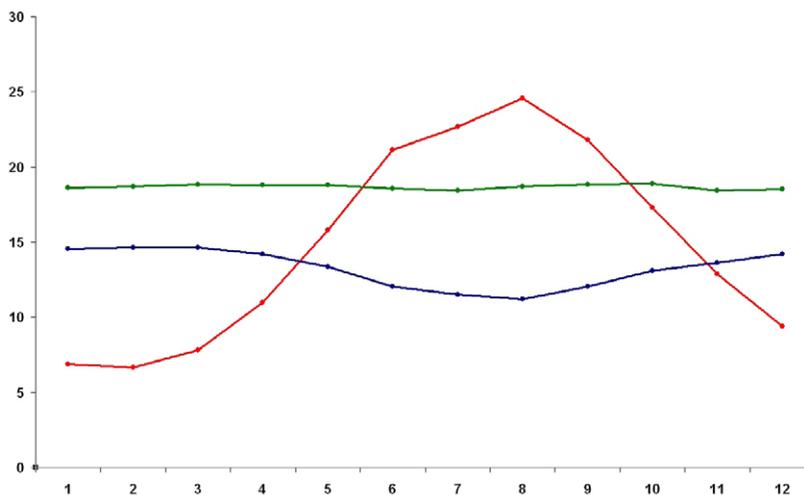


Рис. 5. Годовой ход температуры (красная линия), солёности (зелёная линия) и условной плотности (синяя линия) по данным многолетних наблюдений в районе станции Евпатория

Межгодовые изменения плотности незначительны. За многолетний период наблюдений размах условной плотности составил порядка 1–3 единиц. Для примера на рис. 6 показана межгодовая изменчивость условной плотности по данным наблюдений на станции Евпатория.

В зимний сезон межгодовые колебания условной плотности незначительны – порядка 1–1,5 усл. ед. (рис. 7).

Летом межгодовые колебания условной плотности несколько усиливаются и достигают значений порядка 2–2,5 усл. ед. (рис. 8).

Годовой ход плотности морской воды в мористой части Чёрного моря наиболее значимо прослеживается в верхнем двадцатиметровом слое. С глубиной колебания годового хода плотности становятся близки к нулю, что естественно для вод Чёрного моря [6]. Для сравнения вертикальной структуры плотности рис. 9–12 иллюстрируют это положение.

Размах колебаний плотности в зимний период последнего пятилетия был в пределах 1014,0–1016,0 кг/м³, летом – в пределах 1011,0–1016,0 кг/м³.

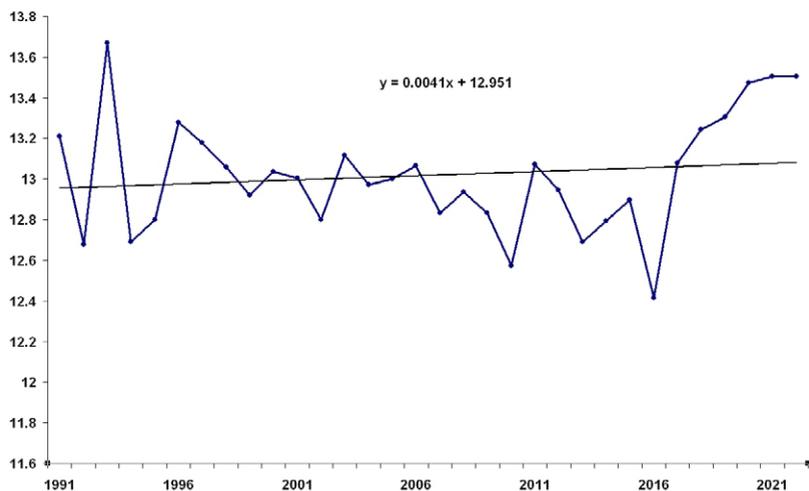


Рис. 6. Межгодовые изменения условной плотности по данным многолетних наблюдений в районе станции Евпатория

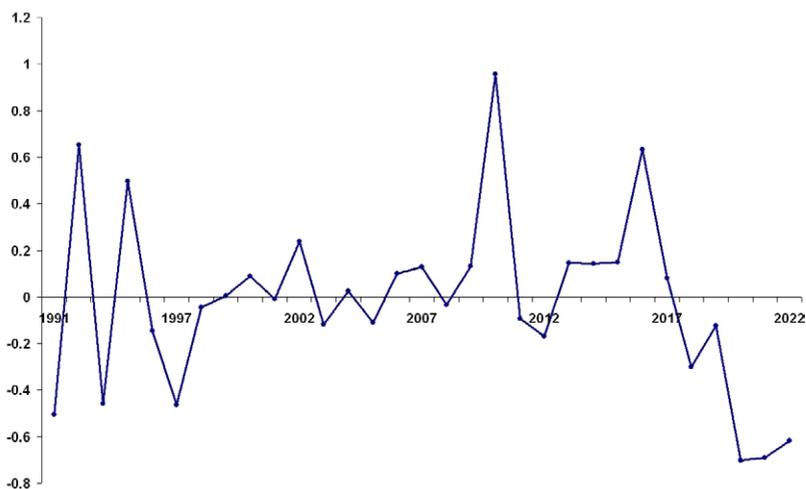


Рис. 7. Межгодовые изменения аномалий условной плотности по данным многолетних наблюдений в районе станции Евпатория зимой

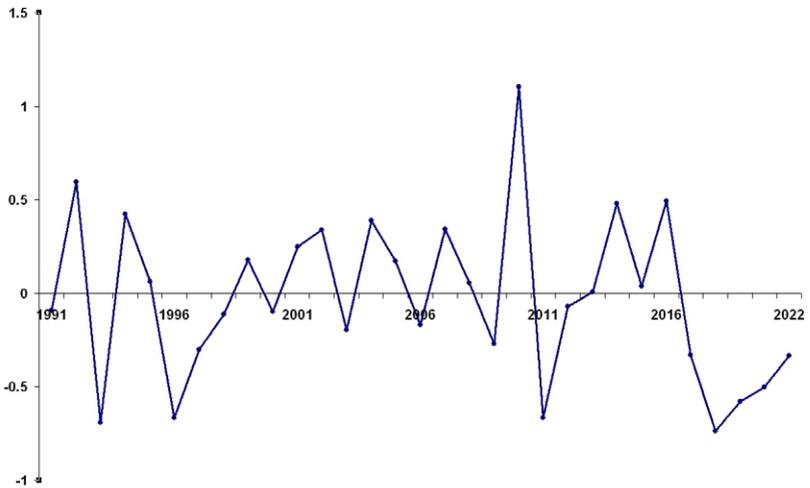


Рис. 8. Межгодовые изменения аномалий условной плотности по данным многолетних наблюдений в районе станции Евпатория летом



Рис. 9. Вертикальное распределение условной плотности морской воды по климатическим данным к юго-западу от Крымского полуострова



Рис. 10. Вертикальное распределение условной плотности морской воды по климатическим данным к юго-западу от Крымского полуострова



Рис. 11. Вертикальное распределение условной плотности морской воды по климатическим данным к юго-востоку от Крымского полуострова

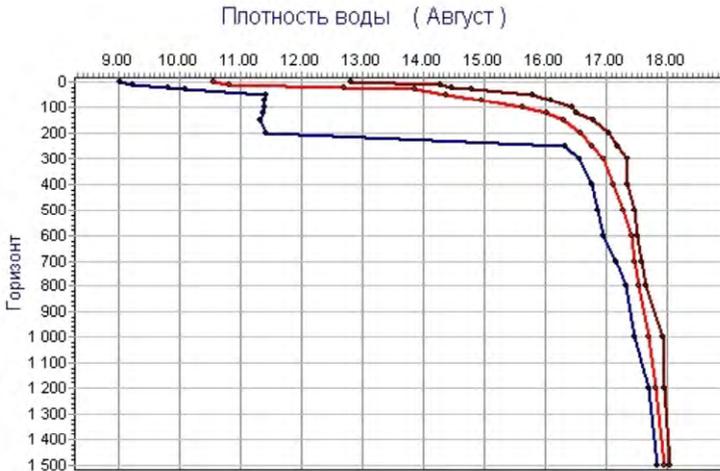


Рис. 12. Вертикальное распределение условной плотности морской воды по климатическим данным к юго-востоку от Крымского полуострова

Климатические оценки за тридцатилетний период составляют зимой от 1014,4 до 1016,4 кг/м³, в летний период, соответственно – 1010,5 и 1016,3 кг/м³. При этом меньшее значение плотности получено в верхнем десятиметровом слое, большее – в слое 100–200 м.

Пространственное распределение поля плотности за климатический период показано на рис. 13 и 14.

Характерное сгущение изопикн отчётливо видно в зонах распреснения днепровскими и дунайскими водами.

Надо отметить, что многолетние колебания температуры и солёности [7] в виде чередования потеплений-похолоданий, осолонений-опреснений совместно формируют изменчивость плотностной структуры. В частности в настоящее время в период значительного потепления и опреснения плотность деятельного слоя уменьшилась в сравнении с климатическими показателями на 0,5–1,0 единиц условной плотности.

Сезонные циклы температуры и солёности (рис. 15, показаны нормированные характеристики T_w и S) как основа для сезонных

циклов плотности воды различаются довольно значительно как по интенсивности, так и по фазам колебаний, однако на сезонную изменчивость влияют мало.

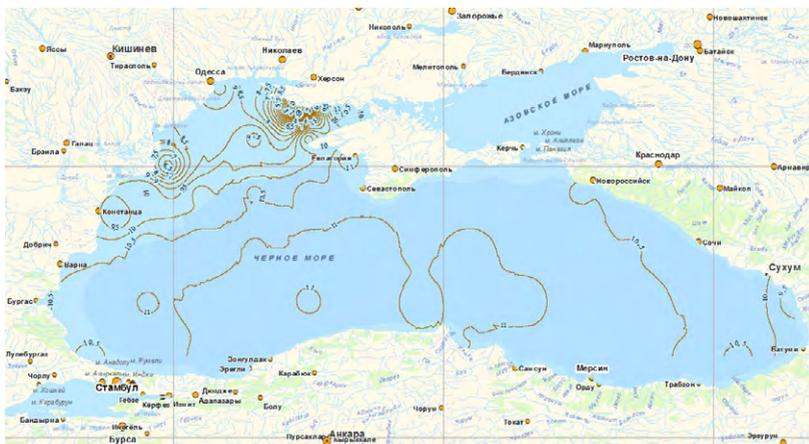


Рис. 13. Распределение плотности морской воды в верхнем слое по климатическим данным в летний период



Рис. 14. Распределение плотности морской воды в верхнем слое по климатическим данным в зимний период

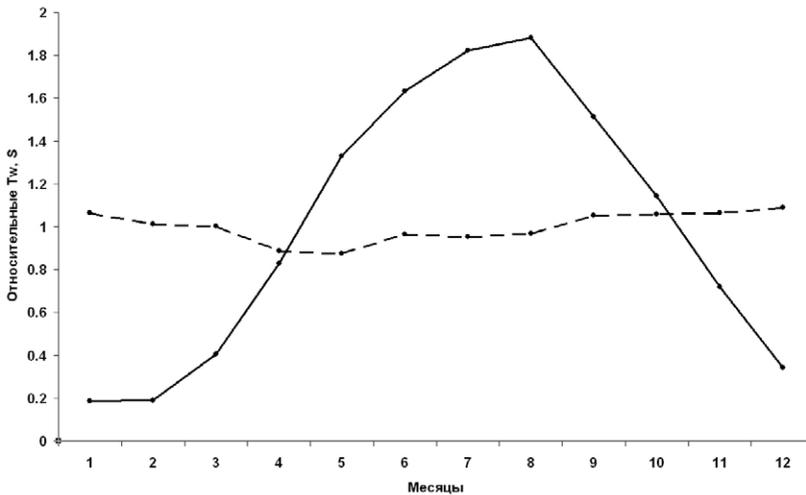


Рис. 15. Сезонная изменчивость температуры (сплошная линия) и солёности (пунктир) морской воды за многолетний период в деятельном слое

Однако следует отметить, что большой размах сезонного хода температуры воды и достаточно хорошо выраженный сезонный ход незначительной амплитуды в целом определяют характер сезонного хода плотности воды в Чёрном море.

И, что характерно, средний размах сезонных колебаний плотности морской воды на поверхности Чёрного моря превышает типичные значения для сезонного хода плотности в Мировом океане [1].

Пространственное распределение поля плотности за последний пятилетний период приведено на рис. 16 и 17.

Однако отсутствие данных наблюдений в юго-западной части Чёрного моря не позволило показать распределение плотности в этом интересном районе моря с мощным распреснением речными водами.

Вертикальная устойчивость водных слоёв, которая зависит в основном от плотности, в Чёрном море очень высока [8], по крайней мере – до глубин порядка 200 м.

Слой максимальной устойчивости в открытом море в летний период находится на глубине, близкой к 25 м, в зимнее время идёт заглублиение слоя максимальной устойчивости до глубин порядка 75–100 м.

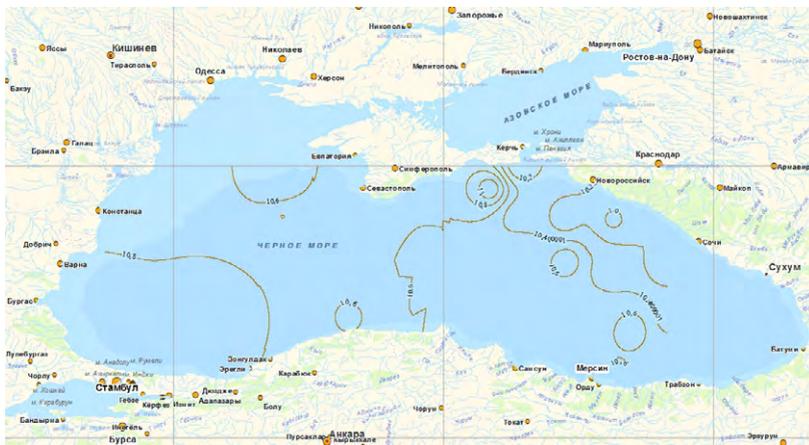


Рис. 16. Распределение плотности морской воды в верхнем слое в летний период по данным за последние пять лет



Рис. 17. Распределение плотности морской воды в верхнем слое в зимний период по данным за последние пять лет

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полонский А.Б., Ловенкова Е.А. Долговременные тенденции в изменчивости характеристик пикноклина Чёрного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 3. С. 419–430.
2. Chen C.T., Millero F.J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range // Limnol. Oceanogr. 1986. V. 31, N 3. P. 657–662.
3. Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 296 с.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV: Чёрное море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 429 с.
5. Белокопытов В.Н. Климатические изменения гидрологического режима Чёрного моря: дис. на соискание учёной степени д-ра геогр. наук. Севастополь: МГИ, 2017. 377 с.
6. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Чёрного моря. Севастополь: МГИ, 2011. 211 с.
7. Дорофеев В.А., Сухих Л.И. Анализ изменчивости гидрофизических полей Чёрного моря в период 1993–2012 гг. на основе результатов выполненного реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 1. С. 33–48.
8. Ильин Ю.П. и др. / Ю.П. Ильин, Л.Н. Репетин, В.Н. Белокопытов, Ю.Н. Горячкин, Н.Н. Дьяков, А.А. Кубряков, С.В. Станичный. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2: Чёрное море. Севастополь: УкрНИГМИ, 2012. 421 с.

УДК 551.582.2

О 21-ЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

В.А. Молодых

*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
vam3@rambler.ru*

Введение

Настоящая работа посвящена вопросу поиска в атмосфере планеты долгопериодных колебаний атмосферных характеристик, в частности температуры приземного воздуха. В данном случае речь пойдёт о колебаниях температуры воздуха с длительностью порядка 20 лет.

Указанная длительность интересна тем, что во внешних факторах, воздействующих на атмосферу Земли, присутствуют цикличность длительностью около 22 лет, обусловленная 22-летним магнитным циклом Солнца, и периодичность 18,6 года, обусловленная приливными эффектами спутника Земли – Луны.

На наличие колебаний температуры воздуха с сопоставимой длительностью указывалось в многочисленных работах. Обзоры таких исследований можно найти в [1, 2].

Результатами этих исследований явились выводы о том, что колебания температуры с указанными периодами являются неустойчивыми как по длительности, так и сильно локализованы по территории, могут проявляться в одних районах и отсутствовать в других. То же самое касается и сезонов (месяцев) года, когда в разные месяцы наблюдаются разные закономерности. При этом проводимый анализ зачастую ограничивался изучением чисто статистической структуры (спектров) рядов на большом числе станций, без выделения колебаний температуры воздуха в явном виде.

Поэтому крайне важным является нахождение на поверхности Земли районов, где какая-либо закономерность проявляется устойчиво на протяжении длинного ряда лет.

Автором ранее предпринимались усилия найти колебания температуры воздуха с подобными периодами для территории Северной Америки [3]. Были сделаны следующие выводы:

- при ограниченной длительности рядов наблюдений невозможно чётко определить, какова более точная длительность колебаний температуры воздуха, и тем самым попытаться выяснить их первопричину, констатировалось просто наличие квазидвадцатилетних колебаний температуры воздуха;
- цикл длительностью от 18 до 22 лет в рядах месячных температур воздуха в Северной Америке статистически значимо присутствует, при этом повторяемость проявления 22-летнего солнечного цикла несколько превышает повторяемость проявления лунного 18,6-летнего;
- повторяемость квазидвадцатилетнего цикла в изменениях температуры воздуха наиболее высока в зимние месяцы, особенно в январе.

Представлялось интересным провести похожее исследование изменений температуры воздуха с возможным квазидвадцатилетним периодом для другой территории.

1. Исходные данные

В качестве такой территории была выбрана территория Японии, для которой на сайте Японского метеорологического агентства [4] доступны сведения о средней месячной температуре воздуха ряда станций за период последних 130–145 лет. При этом данные являются наблюдательными, а не расчётными, привязаны к пункту наблюдений, а не к узлу или площади координатной сетки, в высокой степени однородны, практически не имеют пропусков наблюдений и переносов станций.

Территория Японии была выбрана и по тем соображениям, что климат Японии в силу её географического расположения является океаническим. Японию омывают два океанских течения – тёплое Кюросио (с его более мелкими ответвлениями, омывающими западное побережье) и холодное Курильское. Учитывая всё возрастающие попытки исследователей найти причины изменений климата, в том числе и в изменениях теплосодержания

океана, выбор территории для исследования представляется закономерным.

С учётом результатов, полученных в предыдущих работах автора, для анализа использовались январские месячные значения температуры воздуха по выбранным 15 станциям Японии, по возможности равномерно распределённым по территории и близким к побережьям, для учёта возможного влияния океана на атмосферные процессы. Выбирались станции с максимально длинными рядами наблюдений и минимальным количеством пропусков наблюдений. Сведения о выбранных станциях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень станций для анализа температуры воздуха

№ п/п	Название станции	Широта, град. с.ш.	Долгота, град. в.д.	Анализируемый период и длительность ряда, лет
1	Акита	39,72	140,10	1883–2020 (138)
2	Исиномаки	38,43	141,3	1888–2020 (133)
3	Кагосима	31,55	130,55	1883–2020 (138)
4	Канадзава	36,59	136,63	1882–2020 (139)
5	Коти	33,57	133,55	1886–2020 (135)
6	Нагасаки	32,73	129,87	1879–2020 (142)
7	Наха	26,21	127,69	1891–2020 (130)
8	Немуро	43,33	145,59	1880–2020 (141)
9	Ниигата	37,89	139,02	1882–2020 (139)
10	Сакаи	35,54	133,23	1883–2020 (138)
11	Саппоро	43,06	141,33	1877–2020 (144)
12	Суццу	42,80	140,22	1885–2020 (136)
13	Токио	35,69	139,75	1876–2020 (145)
14	Фукуока	33,58	130,38	1890–2020 (131)
15	Хамамачу	34,71	137,72	1883–2020 (138)

2. Методика анализа данных

В качестве основного метода преобразования исходных данных для их углублённого анализа использовалась цифровая

фильтрация. Этот метод представляет собой скользящее осреднение соседних данных с заранее рассчитанными весовыми коэффициентами. Данный метод широко известен в теории обработки сигналов, но в метеорологии общепринято усреднять данные с равными весовыми коэффициентами, используя три, пять, десять и т.п. отсчётов ряда. При таком осреднении в отфильтрованный ряд вносятся искажения, которые создают в ряду колебания, которых исходно там нет.

Применённая здесь методика цифровой фильтрации для анализа климатических рядов в работах других авторов не использовалась.

Каждый ряд январских температур по 15 станциям подвергался двум преобразованиям.

1. Удалялась долгопериодная составляющая путём расчёта и вычитания из исходного ряда параболического тренда. Очевидно, что такое преобразование направлено на исключение векового хода температуры.

2. Полученный ряд температур подвергался скользящей фильтрации с применением нерекурсивного цифрового фильтра низких частот по методу наименьших квадратов с окном Ханна [5]. Число весовых коэффициентов фильтра было выбрано равным 41. Частота обрезания фильтра задавалась равной 0,075, что соответствует периоду 13,3 года.

Полученные в результате преобразований по пп. 1-2 данного раздела ряды подвергались автокорреляционному анализу, как простому и понятному, без внесения в методику дополнительных предположений, свойственных современным методам анализа спектров [6]. Максимальная величина запаздывания выбиралась равной 40 отсчётам ряда.

Остановимся коротко на свойствах использовавшегося цифрового фильтра.

Передаточная функция фильтра, характеризующая его особенности, представлена на рис. 1.

Применение указанного метода фильтрации позволяет сглаживать (вырезать) в исходном ряду короткопериодные колебания (высокие частоты, межгодовая изменчивость), оставляя только долгопериодные колебания (низкие частоты).

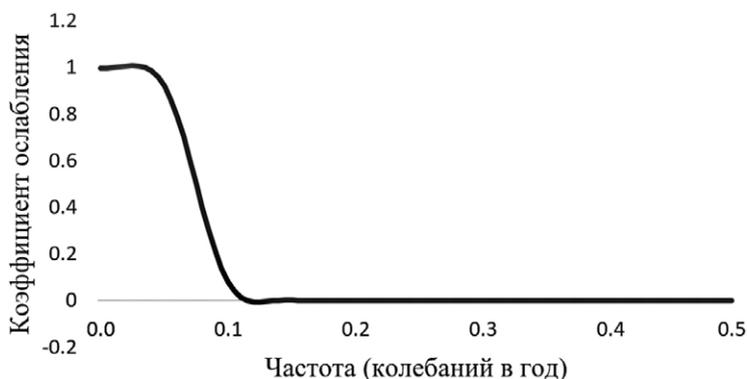


Рис. 1. Передаточная функция фильтра

В табл. 2 приведены характерные точки и значения передаточной функции (коэффициента ослабления) фильтра в зависимости от частоты (периода) колебаний в анализируемом ряду.

Таблица 2

Характеристики цифрового фильтра

№ п/п	Частота колебания (1/год)	Период колебания (лет)	Значение передаточной функции
1	<0,04	>25	≈1,00
2	0,04	25	0,986
3	0,05	20	0,919
4	0,055	18,2	0,863
5	0,06	16,6	0,790
6	0,07	14,3	0,604
7	0,075	13,3	0,500
8	0,08	12,5	0,396
9	0,09	11,1	0,21
10	0,10	10	0,08
11	0,11	9,1	0,01
12	>0,11	<9,1	≈0,00

Из таблицы видно, что применённый метод фильтрации практически не меняет амплитуды низкочастотных колебаний.

При частотах колебаний, сопоставимых с 20-летними, амплитуды колебаний могут уменьшаться на 8–14 % (строки 3-4 таблицы).

Амплитуды возможных колебаний с периодами около 10–11 лет при фильтрации уменьшаются в 5–10 раз, то есть в значительной мере такие колебания отфильтровываются (строки 9-10 таблицы).

Колебания с периодами 9 и менее лет отфильтровываются полностью, их амплитуды уменьшаются в 100 и более раз (строки 11-12).

Поскольку в состав использовавшегося фильтра входит 41 весовой коэффициент, длина ряда в процессе анализа уменьшается на 40 отсчетов (лет). Столь существенная потеря данных при анализе является своеобразной платой за точность анализа долгопериодных колебаний.

Использовавшийся цифровой фильтр является симметричным, поэтому фазовые сдвиги в отфильтрованном ряду отсутствуют. Это позволяет анализировать возможные связи с рядами данных, отражающими внешнее воздействие на атмосферу.

3. Результаты

В табл. 3 приведены результаты расчётов автокорреляционных функций R временных рядов январских температур воздуха по 15 станциям различных районов Японии после удаления из них векового тренда и короткопериодных составляющих. Максимальное запаздывание для R задавалось равным 40.

Таблица содержит названия станций, интервалы лет рядов исходных данных в годах, длительность рядов в годах, выявляемые периоды (экстремумы периодичности) и соответствующие им значения автокорреляционных функций. Поскольку процедура фильтрации может создавать связность между членами временного ряда, то основное внимание обращалось на общий вид автокорреляционных функций без оценки статистической значимости коэффициентов.

Основное внимание обращалось не только на абсолютные значения R , но и на общий вид графиков. Если на графике выделяются экстремумы (максимумы и минимумы) с периодом,

совпадающим или кратным какому-то значению, то это обстоятельство является дополнительным подтверждением присутствия в исходном ряду колебаний с таким периодом, или превышающим его в определённое количество раз.

Таблица 3

Характеристики автокорреляционных функций январских температур по станциям Японии

Станция	Интервал лет исходных данных и длина ряда, лет	Периоды (в годах) и значения R		Вид автокорреляционной функции R с запаздыванием от 0 до 40 лет
1. Наха	1911–2000 90	10–11	-0,397 -0,393	
		19	0,104	
		34	-0,662	
2. Кагосима	1903–2000 98	11	-0,508	
		21	0,414	
		31	-0,723	
3. Канадзава	1902–2000 99	11–12	-0,417 0,420	
		21	0,157	
		30	-0,684	
4. Коти	1906–2000 95	10–11	-0,823 -0,823	
		21	0,752	
		31	-0,867	
5. Нагасаки	1899–2000 102	12	-0,299	
		21	0,204	
		32	-0,730	
6. Сакаи	1903–2000 98	11	-0,548	
		21	0,289	
		31	-0,773	

Продолжение табл. 3

Станция	Интервал лет исходных данных и длина ряда, лет	Периоды (в годах) и значения R		Вид автокорреляционной функции R с запаздыванием от 0 до 40 лет
7. Фукуока	1910–2000 91	11	-0,402	
		21	0,545	
		31	-0,629	
8. Хамамацу	1903–2000 98	11	-0,534	
		21	0,350	
		31	-0,775	
9. Ниигата	1902–2000 99	10	-0,660	
		20	0,312	
		31	-0,273	
10. Исиномаки	1908–2000 93	11	-0,217	
		16	-0,111	
		26	-0,662	
11. Акита	1903–2000 98	9	-0,214	
		16	0,170	
		26	-0,495	
12. Токио	1896–2000 105	11	0,114	
		19	0,473	
		31	-0,351	
13. Суццу	1905–2000 96	8–9	-0,386	
			-0,386	
		16	0,251	
		34	-0,407	

Окончание табл. 3

Станция	Интервал лет исходных данных и длина ряда, лет	Периоды (в годах) и значения R		Вид автокорреляционной функции R с запаздыванием от 0 до 40 лет
14. Саппоро	1897–2000 104	8–9	-0,495 -0,496	
		16	0,324	
		24	-0,293	
		31	0,092	
		37	-0,21	
15. Немуро	1900–2000 101	9	-0,618	
		16–17	0,196 0,198	
		24	-0,353	
		32–33	0,394 0,389	

Значения коэффициентов автокорреляции, превышающие по абсолютной величине 0,5, в таблице выделены жирным начертанием. Анализ вида графиков в табл. 3, характерных значений периодов экстремумов и их величин позволяет отметить закономерность – наличие первого экстремума – минимума значений R – при задержках 10–11–12 лет.

Величина R для десяти станций, расположенных на юге и в центральной части Японии, как на западном побережье, так и на восточном, при этих задержках колеблется от -0,2 до -0,8. Наибольшие по модулю значения R отмечаются для станций Кагосима, Канадзава, Коти, Сакаи, Фукуока, Хамамацу, Ниигата. Экстремально большое по модулю значение R при запаздывании 10-11 лет определяется для ст. Коти (-0,823), следующее за ним – для ст. Ниигата (-0,660), затем – для ст. Сакаи (-0,548).

Для более северных станций первый экстремум R соответствует запаздываниям 8-9 лет и составляет, например, для ст. Немуро: -0,618 (9 лет), ст. Саппоро: -0,495 (8-9 лет), ст. Суццу: -0,386 (8-9 лет).

При рассмотрении второго экстремума рядов R выделялись периоды, близкие к 16 годам (пять станций), 19 годам (три станции), 20 годам (одна станция), 21 году (семь станций). При этом

значения R для периодов 16 и 19 лет находились в основном на небольшом уровне (0,1–0,3). Исключением является ст. Токио, для которой для периода 19 лет значение R равно 0,473.

Для периода 21 год наибольшие значения R составили на ст. Коти (0,752), Фукуока (0,545), Кагосима (0,414).

Третий экстремум рядов R попадает в интервал 30–34 года для 11 станций из 15. При этом третий экстремум – отрицательный по знаку. В интервал 30–32 года третий экстремум попадает у 9 станций и составляет в среднем -0,643. Для ст. Коти экстремум равен -0,867, ст. Хамамацу: -0,775, ст. Сакаи: -0,773, ст. Нагасаки: -0,730, ст. Кагосима: -0,723, ст. Канадзава: -0,684, ст. Фукуока: -0,629, ст. Токио: -0,351, ст. Ниигата: -0,273. Период 30–32 года соответствует по длительности полутора 21–22-летним солнечным циклам.

Обобщая изложенное, можно утверждать, что для нескольких станций Японии в автокорреляционных функциях последовательно выделяются экстремумы с периодами около 11, 21 и 31 года. Причём первый и третий экстремумы отрицательны по знаку и третий экстремум по модулю зачастую больше первого.

Этими станциями являются Кагосима, Канадзава, Коти, Нагасаки, Сакаи, Фукуока, Хамамацу, Ниигата. Они расположены в южной и центральной части территории Японии.

На севере Японии такой закономерности не выявлено. Там, скорее, выделяются характерные периоды 8-9 и 16 лет.

В качестве иллюстрации вида сглаженных рядов январской температуры воздуха на различных станциях в Японии на рис. 2 приведены графики многолетних изменений январских температур воздуха по трём станциям. Там же приведена модифицированная кривая годовых чисел Вольфа. Модификация проводилась путём нормирования чисел Вольфа в 11-летнем цикле на единицу, так что максимумы всех циклов выравнивались по высоте. В нечётных 11-летних циклах значения брались со знаком «минус», в чётных – со знаком «плюс».

Многолетний ход температуры на рис. 2 отчётливо демонстрирует колебания с периодом, близким к 21–22-летнему солнечному. При этом наступление максимумов температур с таким

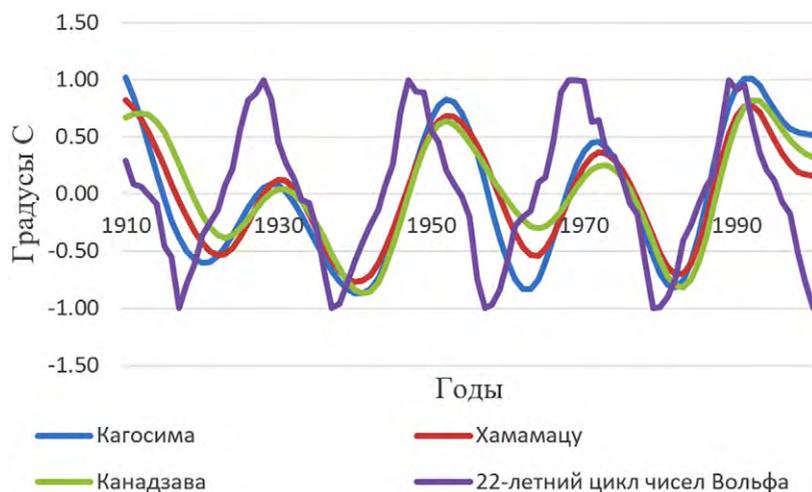


Рис. 2. 21-летние колебания январских температур воздуха в Японии

периодом наблюдается с запаздыванием на 1–5 лет относительно максимумов 22-летнего цикла чисел Вольфа.

Ещё одной особенностью является чередование высот максимумов температуры воздуха в 22-летнем солнечном цикле: высокий – низкий – высокий – низкий – высокий, что косвенно указывает на существование 44-летнего цикла колебаний температуры. Об этом же говорит наличие значительных отрицательных коэффициентов автокорреляции для задержек 30–34 года, соответствующих по длительности трём четвертям 44-летнего солнечного цикла.

Размах температурных колебаний внутри 22-летнего цикла составляет 1,0–1,5 °С, что является не таким уж большим значением. Однако климат Японии на значительной части территории является океаническим, где изменчивость средней месячной температуры от года к году гораздо меньше, чем на континентах в средних и высоких широтах.

Проведённый отдельно анализ автокорреляционной функции модифицированного ряда чисел Вольфа в XX столетии показал наличие максимума R при задержке в 21 год, а не в 22 года.

Тем самым длительность так называемого солнечного 11-летнего цикла в изучаемый период составила в среднем 10,5 года, а двойного солнечного цикла – 21 год. Этим обстоятельством, при допущении определённого влияния солнечной активности на атмосферные и океанические процессы, хорошо объясняется наличие экстремумов автокорреляционной функции R рассмотренных температурных рядов для периодов 10–11, 21, 30–32 года.

Учитывая близкую расположенность большинства рассмотренных станций к морю, можно предположить, что механизм, вызывающий обнаруженные в работе квазидвадцатилетние колебания температуры, связан с переменным энергосодержанием океана и океанических течений. В подтверждение этого обстоятельства говорит тот факт, что 21–22-летние колебания температуры наблюдаются на территориях, находящихся под влиянием тёплого океанического течения Куроисио (юг Японии, запад и восток её центральной части).

Более северные территории с востока находятся под влиянием холодного Курильского течения. Именно на севере Японии и изменяется частотный состав колебаний, и 21–22-летняя цикличность там не наблюдается.

Анализ температурных рядов за другие месяцы года, кроме января, не позволил выявить найденные для январских температур закономерности. Это говорит об ограниченном воздействии рассмотренных внешних факторов на климатическую систему и об их сезонном и региональном характере. Аналогичные выводы были сделаны ранее в [7].

Заключение

1. Анализ рядов январских температур воздуха на 15 длиннорядных станциях на территории Японии показал наличие устойчивых колебаний с характерной длительностью, соответствующей длительности 21–22-летнего солнечного цикла, для южных и центральных районов рассмотренной территории. Данное обстоятельство позволяет локализовать район на поверхности Земли, где отдельные внешние климатообразующие факторы проявляются наилучшим образом.

2. Размах колебаний температуры в указанном цикле составляет 1,0–1,5 °С. Максимумы колебаний температуры в 21–22-летнем цикле наблюдаются спустя 1–5 лет после максимумов двойного солнечного цикла, то есть после максимумов чётных 11-летних циклов.

3. Применение использовавшейся в работе низкочастотной цифровой фильтрации данных с узкой переходной областью показало возможность обнаружения и выделения малых по амплитуде климатических колебаний квазидвадцатилетней длительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Логинов В.Ф.* Космические факторы климатических изменений. Минск: Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, 2020. 168 с.
2. *Шерстюков Б.Г.* Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 294 с.
3. *Молодых В.А.* Об изменениях среднемесячных температур воздуха в Северной Америке с периодом около 20 лет // Труды ГГО. 1986. Вып. 503. С. 142–148.
4. *Сайт* Японского метеорологического агентства (<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/en/smp/index.html>).
5. *Хемминг Р.В.* Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980. 224 с.
6. *Пановский Г.А., Брайер Г.В.* Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 242 с.
7. *Шерстюков Б.Г.* Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // Арктика и Север. 2016. № 24. С. 39–67.

УДК 551.524.77

ТРЕНДЫ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОПАУЗЫ ПО ДАННЫМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Л.Ф. Козлова

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
kozlovalida@meteo.ru, lida_mail@mail.ru*

Введение

По данным исследований последних лет глобальные климатические изменения проявляются не только в приземном слое атмосферы, но и на границе перехода из тропосферы в стратосферу – уровне тропопаузы. Тренды изменения температуры по данным радиозондирования за последние десятилетия показали, что максимальный эффект глобального потепления в Северном полушарии наблюдается в нижней тропосфере полярной области [1, 2]. В этой связи усиливается внимание исследователей к изучению многолетних тенденций изменения характеристик на уровне тропопаузы именно в Арктическом регионе. По изменениям характеристик тропопаузы можно судить о происходящих климатических изменениях. Настоящее исследование является продолжением цикла работ по данной теме [3–5].

Данные и их обработка

Значения трендов месячных аномалий характеристик тропопаузы были получены по данным наблюдений на 39 относительно полных и длиннорядных аэрологических станциях территории РФ Арктического и Полярного регионов за 44-летний период.

Область исследования охватывает регион с координатами приблизительно с 60° с.ш. по 80° с.ш. и 30° в.д. по 180° в.д. Полный перечень станций с индексами и координатами приводился ранее в статье [5].

Радиозондовые данные продолжают оставаться одним из основных источников информации о тропопаузе. Для расчёта характеристик тропопаузы использовались данные массивов АЭРОСТАБ и АЭРОСТАС [6–8], которые включают текущие данные радиозондовых наблюдений, собираемые в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» по глобальной сети станций. Содержанием архива являются проконтролированные значения давления, высоты геопотенциала, температуры и других характеристик на разных уровнях, в том числе и на уровне тропопаузы. Массив охватывает период с 01.06.1978 по 31.12.2022 год. Данные прошли комплексный физико-статистический контроль качества на этапе формирования первичного массива данных АЭРОСТАС [9, 10].

Проводилась проверка соответствия данных на уровне тропопаузы критерию ВМО, согласно которому тропопауза и её характер определяются по значениям и изменению вертикального градиента температуры [11–13]. Границей, разделяющей полярную и тропическую тропопаузы была принята высота 14 км. Все случаи с высотой нижней границы тропопаузы до 14 км относились к полярной тропопаузе, а выше – к тропической. Применение такого метода идентификации географического типа тропопаузы значительно упростило получение её характеристик, допуская при этом небольшие абсолютные ошибки.

Расчёты проводились с использованием профессиональных статистических пакетов.

Анализ трендов тропопаузы

В ходе проделанной работы были получены следующие характеристики на уровне нижней границы тропопаузы:

- тренды для отдельных месяцев, годовой ход трендов;
- тренды для хронологически упорядоченных аномалий

В таблице представлены значения трендов по тем станциям, для которых стандартные ошибки вычисления трендов всех трёх характеристик не превышают сами значения трендов по абсолютной величине. В скобках указаны стандартные ошибки вычисления трендов.

Т а б л и ц а

Оценки линейных трендов месячных аномалий температуры, давления и высоты геопотенциала на нижней границе тропопавзы

Станция	Индекс станции	Тренд Н (ГПМ/10 лет)	Тренд Т (°С/10 лет)	Тренд Р (гПа/10 лет)
ГМО им. Кренкеля	20046	72,84(17,51)	-0,23(0,09)	-3,07(0,73)
м. Челюскин	20292	96,08(20,19)	-0,12(0,09)	-4,25(0,78)
о. Диксон	20674	70,46(21,37)	-0,2(0,1)	-2,81(0,84)
Тикси	21824	84,69(17,29)	-0,07(0,07)	-3,34(0,64)
Чокурдах	21946	59,65(16,28)	-0,24(0,07)	-3,04(0,59)
Мурманск	22008	29,39(17,02)	-0,13(0,07)	-2,03(0,59)
Архангельск	22543	75,85(18,94)	-0,17(0,07)	-2,96(0,56)
Каргополь	22845	-102,77(21,15)	-0,26(0,07)	4,02(0,66)
Нарьян-Мар	23205	82,36(20,36)	-0,34(0,08)	-3,4(0,64)
Салехард	23330	86,08(19,24)	-0,21(0,08)	-3,5(0,67)
Печора	23415	-87,04(21,8)	-0,2(0,07)	2,97(0,72)
Сыктывкар	23802	52,02(18,73)	-0,2(0,07)	-2,32(0,58)
Бор	23884	-45,22(19,4)	-0,09(0,08)	1,52(0,69)
Оленёк	24122	55,45(16,08)	-0,23(0,07)	-2,24(0,64)
Верхоянск	24266	35,24(16,59)	-0,16(0,07)	-2,14(0,57)
Жиганск	24343	68,26(17,39)	-0,17(0,07)	-2,95(0,65)
Вилюйск	24641	19,62(18,14)	-0,13(0,07)	-0,79(0,64)
Оймякон	24688	33,74(17,12)	-0,21(0,07)	-2,18(0,6)
Мирный	24726	102,04(17,17)	-0,12(0,07)	-3,42(0,64)
Ванавара	24908	43,28(18,14)	0,14(0,07)	-1,27(0,67)
Олёкминск	24947	31,25(14,97)	-0,12(0,06)	-1(0,53)
Якутск	24959	24,94(15,49)	-0,09(0,06)	-1,04(0,54)
Зырянка	25403	42,75(17,22)	-0,12(0,07)	-2,36(0,56)
Сеймчан	25703	32,67(17,48)	-0,08(0,07)	-1,96(0,57)

Тренды месячных аномалий высоты НГТ для 67,5 % исследуемых станций положительны, для 15 % – статистически незначимы. Максимальное положительное значение тренда высоты фиксируется на станции Мирный.

Для 75 % исследуемых арктических станций тренды месячных аномалий температуры НГТ являются статистически значимыми отрицательными. Максимальное отрицательное значение тренда температуры определяется для станции Нарьян-Мар. Тренды месячных аномалий давления НГТ для 70 % исследуемых станций

отрицательны, для 12,5 % – положительны. Для станции м. Челюскин получено максимальное отрицательное значение тренда месячных аномалий давления. Отмечается корреляционная связь между трендами высоты и температуры. Такие оценки линейных трендов месячных аномалий хорошо согласуются с результатами других более ранних исследований по радиозондовым данным [14–16]. Так полученное среднее значение тренда высоты на уровне НГТ $52,8 \pm 18,1$ ГПМ/10 лет близко к значению величины глобального тренда высоты 64 ± 21 ГПМ/10 лет, рассчитанного в рамках работы [15].

Интересные результаты даёт сравнение оценок трендов высоты тропопазузы со значениями, полученными по аэрологическим сводкам тех же станций за более ранние периоды [3, 4]. Для анализа были взяты оценки по станциям Норильск, Туруханск и Печора за период 1978–2007 гг., полученные в рамках исследования [3], а также аналогичные оценки, выведенные в рамках работы [4] за период 1978–2018 гг. Заметна тенденция уменьшения величины отрицательных трендов высоты на уровне НГТ для отдельных станций более чем на 50 % (рис. 1).

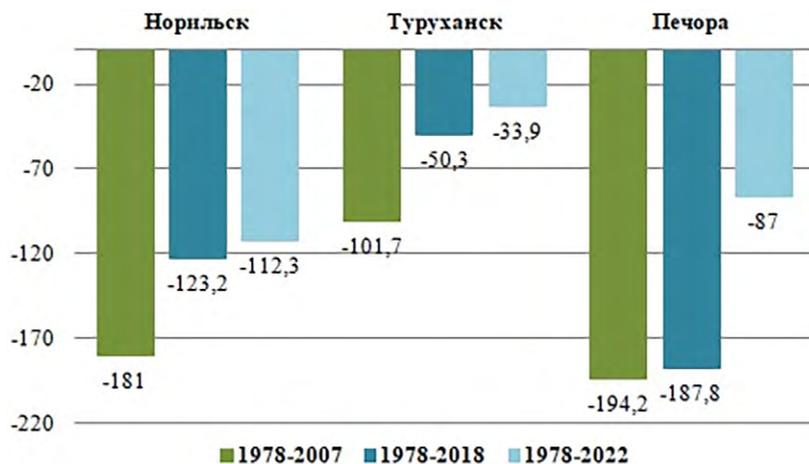


Рис. 1. Значения трендов месячных аномалий высоты на уровне НГТ (ГПМ/10 лет) для станций Норильск, Туруханск и Печора за периоды 1978–2007, 1978–2018, 1978–2022 гг.

Рассмотрены особенности годового хода трендов. На рисунке ниже показан годовой ход значимых оценок трендов месячных аномалий температуры, высоты и давления на уровне НГТ тропопauses по всем станциям (рис. 2).

Видно, что при рассмотрении трендов за отдельные месяцы, картина более сложная и неоднозначная, чем для результатов оценки трендов месячных аномалий по хронологически упорядоченным данным. Максимальные положительные значения трендов высоты приходятся на декабрь. Из общей картины выбиваются февральские и мартовские значения трендов, преимущественно отрицательные. Годовой ход трендов месячных аномалий температуры согласуется с годовым ходом по высоте и находится в противофазе. По графику можно увидеть максимальные отрицательные значения трендов температуры в декабре. Годовой ход трендов месячных аномалий давления на уровне НГТ также находится в корреляции с годовым ходом трендов высоты.

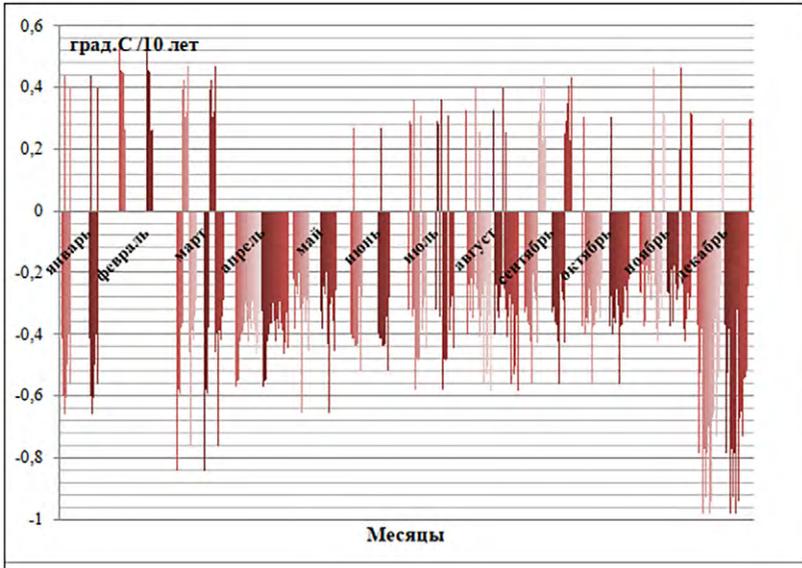


Рис. 2-1. Годовой ход линейных трендов температуры ($^{\circ}\text{C} / 10 \text{ лет}$)

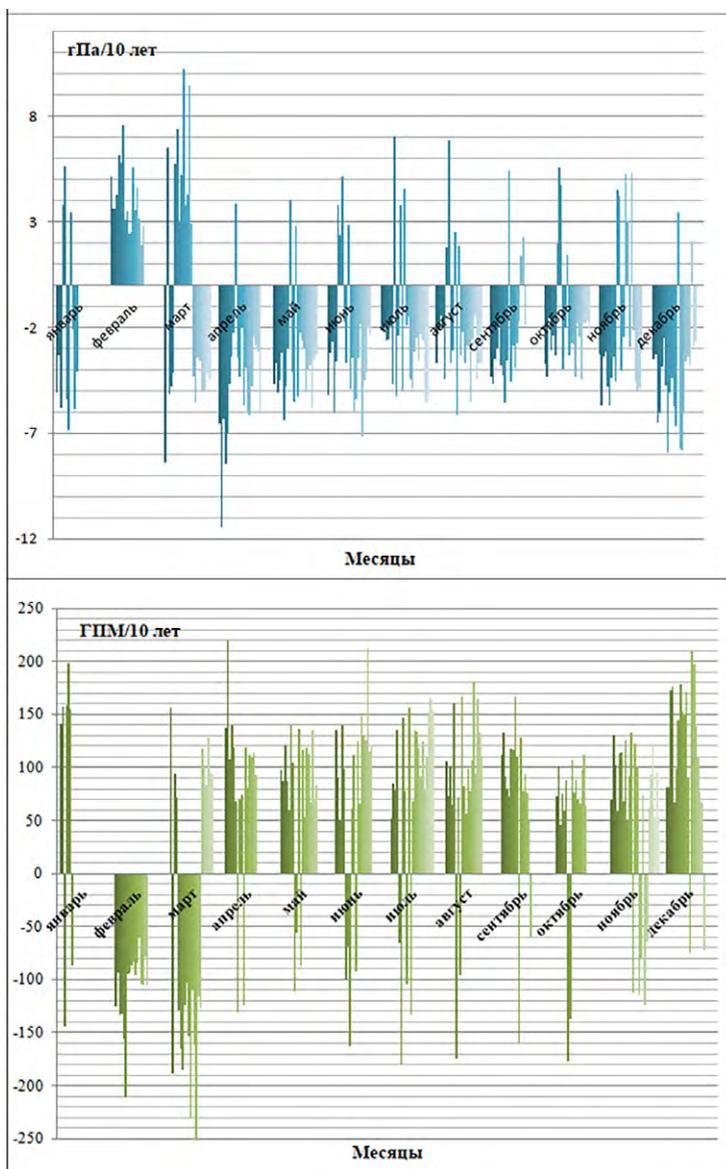


Рис. 2-2. Годовой ход линейных трендов давления (гПа/10 лет) (верхний рисунок) и геопотенциальной высоты (ГПМ/10 лет) (нижний рисунок) по арктическим станциям территории РФ

Заключение

Проанализированы аэрологические сводки станций Арктического региона РФ за последние сорок четыре года. Были получены оценки линейных трендов характеристик тропопаузы для каждой из рассмотренных длиннорядных станций. Тренды высоты геопотенциала на нижней границе тропопаузы для большинства станций являются статистически значимыми положительными. Для станции Мирный было отмечено максимальное положительное значение тренда месячных аномалий высоты на нижней границе тропопаузы – 102,1 ГПМ/10 лет.

Были рассмотрены особенности годового хода трендов. Характер трендов высоты и температуры для нижней границы тропопаузы (полярной) соответствует представлениям об изменении климата и увеличении высоты тропопаузы. Характеристики трендов тропопаузы, полученные в результате данного исследования, позволят обновить базу данных, подготовленную ранее в рамках работы [17], массивом актуальных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванова А.Р.* Динамика арктической тропопаузы и её связь с фронтогенезом /А.Р. Иванова, Н.И. Богаевская. С-Пб.: Гидрометеоздат, 2005. 20 с.
2. *NASA Global Climate Change* [Электронный ресурс] [сайт] URL: <https://climate.nasa.gov/evidence/> (дата обращения: 15.04.2018). Загл. с экрана. Яз. англ.
3. *Козлова Л.Ф., Стерин А.М.* Исследование многолетней изменчивости параметров тропопаузы над территорией РФ по радиозондовым данным // Труды ВНИИГМИМЦД. 2014. Вып. 178. С. 47–60.
4. *Козлова Л.Ф., Стерин А.М.* Анализ характеристик тропопаузы в Арктическом регионе // Сборник трудов CITES-2019. Международная молодёжная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. Томск: Изд-во Томского НЦТИ, 2019. С. 98–100.
5. *Козлова Л.Ф., Руденкова Т.В., Хохлова А.В.* Массив характеристик тропопаузы по данным радиозондирования в Арктическом регионе // Труды «ВНИИГМИ-МЦД». 2021. Вып. 187. С. 178–185.
6. *Архив* текущей аэрологической информации АЭРОСТАБ. Описание архива / Составители: О.А. Алдухов, В.А.Оржеховская, Т.О. Садовникова, Т.В. Руденкова. Обнинск, 1990.

7. *Описание* символьного формата хранения данных аэрологических наблюдений, поступающих по каналам связи для ПЭВМ (формат АЭРОСТАС) / Составитель: Т.В. Руденкова. Обнинск, 2009.

8. *Руденкова Т.В.* Формат архивации текущих аэрологических данных, поступающих по каналам связи для ПЭВМ // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 174. С. 41–63.

9. *Алдухов О.А., Черных И.В.* Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Том. 1: Контроль качества и обработка данных. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2013. 306 с.

10. *Алдухов О.А., Черных И.В.* Принципы контроля качества массивов результатов радиозондирования атмосферы // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 92–101.

11. *Маховер З.М.* Климатология тропопаузы. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 254 с.

12. *Авиационно-климатический атлас-справочник СССР* / Под ред. З.М. Маховера. М.: НИИАК, 1969. Вып. 5.

13. *Иванова А.Р.* Тропопауза – многообразие определений и современные подходы к идентификации. М.: МГУ, 2013. 88 с.

14. *Lingyun Meng, Jane Liu, David W. Tarasick, William J. Randel, Andrea K. Steiner, Hallgeir Wilhelmsen, Lei Wang, Leopold Haimberger,* 2021 Nov 5: Continuous rise of the tropopause in the Northern Hemisphere over 1980–2020 // *Science Advances*, 7(45):eabi8065. doi: 10.1126/sciadv.abi8065.

15. *Seidel D.J., Randel W.J.* 2006: Variability and trends in the global tropopause estimated from radiosonde data // *J. Geophys. Res.* 111, D21101, doi:10.1029/2006JD007363.

16. *Шаркова С.А., Червяков М.Ю.* Исследование изменчивости характеристик тропопаузы в арктической зоне по данным радиозондирования // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2018. 21 с.

17. *Козлова Л.Ф., Хохлова А.В., Руденкова Т.В.* База данных: «Климатические характеристики тропопаузы в Арктическом и Полярном регионах РФ по аэрологическим наблюдениям». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622189. РФ. М. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2022. Регистрационный номер НИОКТР АААА-А20-120071090073-0. Регистрационный номер РИД 622110800115-3. Регистрационный номер состояния правовой охраны РИД 822111000015-9.

УДК 551.576.1:551.58

Долгопериодные оценки границ и толщины восстановленных по радиозондовым профилям облачных слоёв для российских станций. Черных И. В., Алдухов О. А. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 5 – 18.

Статья содержит информацию о долгопериодных оценках границ и толщины облачных слоёв, восстановленных по срочным радиозондовым наблюдениям в слое атмосферы от уровня земли до высоты 10 км, проводимых на 58 станциях территории РФ и соседних регионов за период 1964–2018 гг. Они получены с использованием SE-метода, разработанного для определения границ и количества облачности по профилям температуры и влажности на основе данных срочных радиозондовых наблюдений. Результаты могут быть использованы для проведения прикладных и исследовательских работ по изучению климата атмосферы и вертикальной макроструктуры облачных слоёв.

Ключевые слова: облачность, вертикальная макроструктура, облачные слои, нижняя и верхняя границы, толщина, данные радиозондирования атмосферы, долгопериодные оценки, территория РФ и соседних регионов.

Табл. 6. Библиогр. 29.

УДК 551.524

Гомогенизация данных среднемесячных осадков по метеорологическим станциям России. Финаев А. Ф., Разуваев В. Н. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 19 – 33.

В статье представлен анализ результатов гомогенизации данных среднемесячных осадков 518 станций России с использованием пакета RHTests. Показана статистическая информация при сравнении однородных и неоднородных данных станций в среднем по каждому месяцу за весь период проведённых наблюдений. На основе результатов гомогенизации построены карты распределения среднемесячных осадков по исследуемой территории. Выявлены различия в оценке среднемесячных осадков при использовании однородных и неоднородных данных станций и моделированных карт. Показано, что по однородным данным годовое количество осадков на 2,1–2,2 % больше, чем по неоднородным.

Ключевые слова: климат, метеорология, осадки, гомогенизация, однородные ряды данных.

Ил. 9. Табл. 4. Библиогр. 10.

УДК 551.524

Гомогенизация данных суточных осадков по метеорологическим станциям России. Финаев А.Ф., Разуваев В.Н. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 34 – 44.

В статье представлены результаты гомогенизации данных суточных осадков 518 станций России с использованием пакета RHtests_dlyPrsr. Приведены итоги сравнения однородных и неоднородных данных станций за весь период наблюдений. Выявлены различия в количестве нарушений однородности при сравнении результатов гомогенизации среднемесячных и суточных осадков на станциях и их распределение по территории.

Ключевые слова: климат, метеорология, осадки, гомогенизация, однородные ряды данных.

Ил. 11. Табл. 1. Библиогр. 13.

УДК 551.521.11:551.583.1

Климатический режим солнечного сияния на территории России. К л е - щ е н к о Л.К. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 45 – 55.

Рассчитаны новые нормы месячных, сезонных и годовых сумм продолжительности солнечного сияния (ПСС) на метеорологических станциях РФ – 30-летние средние за период 1991–2020 гг. Представлено их пространственное распределение и получены средние значения для квазиоднородных физико-географических районов РФ.

В целях изучения динамики климатического режима проведено сопоставление ПСС для 30-летних периодов 1961–1990 и 1991–2020 гг. В первом 30-лети в среднем для территории РФ происходило уменьшение ПСС (линейный тренд составил -9 ч/10 лет), во втором – увеличение (+27 ч/10 лет). По сравнению с первым 30-летием средняя суммарная годовая продолжительность солнечного сияния увеличилась на 29 часов. Основной вклад в это увеличение внесли весенний и летний сезоны. Наиболее значительный рост ПСС (+65 часов) произошёл на юге европейской территории России. В то же время в северных регионах страны наблюдается уменьшение годовых сумм ПСС.

На основе анализа средних сезонных сумм ПСС для последовательных 10-летних периодов выявлены основные особенности структуры их многолетних изменений.

Ключевые слова: продолжительность солнечного сияния, средние многолетние значения, географическое распределение, региональные средние, особенности многолетних изменений, оценки линейного тренда.

Ил. 6. Табл. 5. Библиогр. 6.

УДК 551.501.771

Характеристика климатических изменений относительной влажности воздуха на азиатской территории России за период 1966–2021 гг. Кузнецова В.Н., Швець Н.В. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 56–67.

В статье представлены результаты расчётов климатических изменений относительной влажности воздуха на азиатской территории России за период 1966–2021 гг. Проведены трендовые оценки изменений относительной влажности воздуха, выявлены районы с тенденцией увеличения влажности воздуха за исследуемые десятилетия и районы, характеризующиеся уменьшением влажности. Показана пространственная и сезонная неоднородность в изменениях относительной влажности воздуха на всей азиатской территории России.

Ключевые слова: климат, линейный тренд, трендовая оценка, относительная влажность воздуха, климатические изменения, азиатская территория России.

Ил. 5. Табл. 2. Библиогр. 13.

УДК 551.583.1

Вычисление прогностических оценок изменений месячных значений температуры воздуха и атмосферных осадков в России на два десятилетия. Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 68–87.

Выполнен поиск узлов географической сетки с наилучшими асинхронными связями между температурой воздуха на станциях РФ и температурой поверхности океана, а также между количеством осадков по станциям РФ и температурой поверхности океана. Наилучшие связи оказались при запаздывании изменений температуры воздуха и количества осадков на 30 лет и более относительно изменений температуры поверхности океана в зависимости от удалённости станции от узла.

Дополнительно определены асинхронные связи упомянутых климатических параметров с данными о космических факторах. Они оказались полезным дополнением к асинхронным связям с температурой поверхности океана. Информативность предикторов оценивалась по вычисленным коэффициентам детерминации. Совместное влияние разных факторов обобщалось в уравнении множественной асинхронной корреляции.

Асинхронные регрессионные соотношения, основанные на инерционных связях, сглаженных по трёхлетиям среднемесячной температуры воздуха и количества осадков с заведомо известными изменениями температуры поверхности океана в узлах сетки в прошлом и с другими предикторами, позволяют примерно на половине всех станций РФ получить оценки сглаженных изменений температуры и осадков на 10 и 20 лет. К таким удачным районам относятся территории, находящиеся в зоне наибольшего влияния Атлантического, Тихого и, возможно, Индийского океанов.

Ключевые слова: изменения климата, температура воздуха, количество осадков, прогноз, тенденция.

Ил. 6. Табл. 6. Библиогр. 8.

УДК 551.465.7

Мониторинг циклонической активности в Северной Атлантике на основе показателей ЕСИМО. Вязилова Н.А. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 88–98.

Мониторинг циклонической и штормовой активности в Северной Атлантике и Европе, включая европейскую часть России, выполняется в рамках прикладной задачи Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО), включает ежемесячный расчёт показателей и индикаторов циклонической активности, представление значений этих показателей в форме информационных ресурсов на портале ЕСИМО и построение средствами портала ЕСИМО карт пространственного распределения и графиков временного изменения показателей.

Ключевые слова: мониторинг циклонической активности, прикладная задача ЕСИМО.

Ил. 4. Библиогр. 5.

УДК 551.465.7

Циклоническая активность в Северной Атлантике по данным реанализа ERA5 и колебания атмосферной циркуляции. Вязилова Н.А., Вязилов А.Е. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 99–110.

В статье представлен анализ особенностей пространственного распределения климатических характеристик циклонической активности в Северной Атлантике и Европейском регионе в зимний сезон, а также взаимосвязи межгодовой изменчивости циклонической активности с северо-атлантическим и восточно-атлантическим колебаниями крупномасштабной атмосферной циркуляции. Анализ циклонической активности выполнен по данным реанализа ERA5 для 42 зимних сезонов за период с 1979 по 2021 год.

Ключевые слова: циклоническая активность, атмосферная циркуляция.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр. 9.

УДК 551.465

Солёностный режим Чёрного моря в последние пять лет. Воронцов А.А., Баталкина С.А., Булыгин А.М., Нефёдова Г.И. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 111–120.

В статье рассмотрены характеристики изменения режима солёности морской воды в последние годы на акватории Чёрного моря. Приведены сравнительные оценки солёности за современный климатический период и за последние пять лет. Показаны положительные тренды режима солёности морской воды как в прибрежной зоне в российском секторе Чёрного моря, так и на акватории моря в целом.

Ключевые слова: Чёрное море, климат моря, режим, солёность морской воды, океанография, гидрометеорологическая станция.

Ил. 7. Табл. 1. Библиогр. 5.

УДК 551.465

Изменения термического режима деятельного слоя Чёрного моря. Воронцов А.А., Баталкина С.А., Нефёдова Г.И. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 121–130.

В статье рассмотрены характеристики изменения термического режима деятельного слоя Чёрного моря за последние годы. Приведены сравнительные оценки температуры морской воды за современный климатический период и за последние пять лет. Показаны положительные тренды термического режима морской воды как в прибрежной зоне, так и на акватории Чёрного моря в целом.

Ключевые слова: Чёрное море, климат моря, режим, температура морской воды, океанография, гидрометеорологическая станция.

Ил. 4. Табл. 6. Библиогр. 5.

УДК 551.465

Тенденции изменения плотности морской воды Чёрного моря в современный период. Воронцов А.А., Нефёдова Г.И., Баталкина С.А. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 131 – 145.

В статье рассмотрены характеристики изменения режима плотности деятельного слоя на акватории Чёрного моря за современный период (1980–2022 гг.). Приведены оценки плотности морской воды за климатический период 1990–2020 гг. и за последние пять лет. Показаны тенденции изменения режима плотности морской воды как в прибрежной зоне, так и на акватории Чёрного моря в целом.

Ключевые слова: Чёрное море, климат моря, режим, плотность морской воды, океанография, гидрометеорологическая станция.

Ил. 17. Табл. 4. Библиогр. 8.

УДК 551.582.2

О 21-летних колебаниях температуры воздуха. Молодых В.А. Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. Вып. 191. С. 146 – 158.

Анализ рядов январских температур воздуха на 15 длиннорядных станциях на территории Японии с применением низкочастотной цифровой фильтрации показал наличие устойчивых колебаний с характерной длительностью, соответствующей длительности двойного солнечного цикла (21 год) для южных и центральных районов рассмотренной территории.

Размах колебаний температуры в указанном цикле составляет 1,0–1,5 °С. Максимумы колебаний температуры в 21-летнем цикле наблюдаются спустя 1–5 лет после максимумов двойного солнечного цикла, то есть после максимумов чётных 11-летних циклов.

Ключевые слова: температура воздуха, солнечная активность, 21-летний цикл.

Ил. 2. Табл. 3. Библиогр. 7.

УДК 551.524.77

Тренды характеристик тропопаузы по данным радиозондирования в Арктическом регионе. Козлова Л. Ф. 2023. Вып. 191. С. 159 – 166.

В статье приводятся результаты исследования временной изменчивости характеристик тропопаузы в Арктическом регионе в различные сезоны за период 1978–2022 гг. Анализируются тренды месячных аномалий высоты, температуры и давления на уровне нижней границы тропопаузы (полярной) по данным тридцати девяти аэрологических станций, расположенных на территории РФ. Для большинства из рассмотренных станций фиксируются статистически значимые положительные значения трендов высоты геопотенциала на уровне нижней границы тропопаузы. Результаты расчётов приводятся и обсуждаются.

Ключевые слова: аэрологические наблюдения, тропопауза, климат, тренды, Арктический регион, радиозондовые данные.

Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 17.

UDC 551.576.1:551.58

Longtime Estimations of Boundaries and Thickness of Cloud Layers Reconstructed from Radiosonde Observations for Russian Stations. Chernykh I.V., Aldukhov O.A. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 5 – 18.

The paper contains information on longtime estimations of boundaries and thickness of cloud layers, reconstructed from hourly radiosonde observations in the atmospheric layer from the surface level up to the 10-km height. The estimations were conducted at 58 stations of the Russian territory and the neighboring regions during the period 1964–2018. They were obtained with CE-method developed to determine the boundaries and amount of cloudiness based on temperature and humidity profiles obtained from hourly radiosounding observations. The results may be used in applied work and researches on the climate of atmosphere and the vertical macrostructure of cloud layers.

Keywords: cloudiness, vertical macrostructure, cloud layers, cloud base and top, cloud thickness, upper air data, longtime estimations, Russian Federation and neighbor regions.

Tab. 6. Ref. 29.

UDC 551.524

Homogenization of mean monthly precipitation data for meteorological stations of Russia. Finaev A.F., Razuvaev V.N. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 19 – 33.

The article represents the analysis of homogenization of mean monthly precipitation data for 518 stations in Russia using the RHTests package. Statistical information was shown when comparing monthly averaged homogeneous and heterogeneous data from stations for the entire observation period. Maps of mean monthly precipitation distribution over the studied territory were calculated based on the results of homogenization. Differences in estimation of mean monthly precipitation were revealed using homogeneous and heterogeneous station data and simulated maps. It is shown that according to homogeneous data, annual precipitation was 2.1–2.2 % higher as compared to heterogeneous data.

Keywords: climate, meteorology, precipitation, homogenization, homogeneous data series.

Fig. 9. Tab. 4. Ref. 10.

UDC 551.524

Homogenization of Daily Precipitation Data from Meteorological Stations in Russia. Finaev A. F., Razuvaev V. N. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 34 – 44.

The article represents results of homogenization of daily precipitation data from 518 stations in Russia using the RHtests_dlyPrpc package. Results of the comparison of homogeneous and heterogeneous station data for the entire observation period are shown. Differences in the number of data series disruptions were revealed when comparing results of homogenization of mean monthly and daily precipitation at stations and their distribution over the territory.

Keywords: climate, meteorology, precipitation, homogenization, homogeneous data series.

Fig. 11. Tab. 1. Ref. 13.

UDC 551.521.11:551.583.1

The climatic regime of sunshine on the territory of Russia. Kleschenko L. K. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 45 – 55.

The new norms of monthly, seasonal and annual amounts of sunshine duration (SD) – 30-year averages for the period 1991–2020 – at meteorological stations of the Russian Federation were calculated. Their spatial distribution is presented and the average values for quasi-homogeneous physical-geographical regions of the Russian Federation are obtained.

In order to study the dynamic of the climatic regime, the SD was compared for the 30-year periods 1961–1990 and 1991–2020. In the first 30-year period, on the average for the territory of the Russian Federation, there was a decrease in SD (the linear trend was -9 hours / 10 years), in the second – an increase (+27 hours / 10 years). Compared with the first 30-year period, the average total annual duration of sunshine increased by 29 hours. The main contribution to this increase was made by the spring and summer seasons. The most significant increase in SD (+65 hours) occurred in the south of European Russia. At the same time, in the northern regions of the country, there is a decrease in the annual SD totals.

Based on the analysis of the average seasonal amounts of DSS for consecutive 10-year periods, the main features of the structure of their multi-year changes are revealed.

Keywords: sunshine duration, average multi-year values, geographical distribution, regional averages, features of long-term changes, linear trend estimates.

Fig. 6. Tab. 5. Ref. 6.

UDC 551.501.771

Characteristics of Climate Changes in Relative Air Humidity in Asian Russia for the Period 1966–2021. Kuznetsova V.N., Shvets N.V. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 56–67.

The article presents the results of calculations of climatic changes in relative air humidity in Asian Russia for the period 1966–2021. Trend assessments of changes in relative air humidity were carried out, areas with a tendency to increase air humidity over the decades under study and the areas characterized by humidity decrease were identified. Spatial and seasonal heterogeneity in relative air humidity changes in Asian Russia is shown.

Keywords: climate, linear trend, trend assessments, relative air humidity, climate changes, Asian Russia.

Fig. 5. Tab. 2. Ref. 13.

UDC 551.583.1

Calculation of prognostic estimates of changes in monthly values of air temperature and precipitation in Russia for two decades. Sherstyukov B.G., Sherstjukov A.B. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 68–87.

The search for nodes of the geographical grid with the best asynchronous connections between the air temperature at the stations of the Russian Federation and the temperature of the ocean surface, as well as between the amount of precipitation at the stations of the Russian Federation and the temperature of the ocean surface is performed. The best connections were found when the changes in air temperature and precipitation were delayed by 30 years or more relative to changes in ocean surface temperature, depending on the distance of the station from the node.

Additionally, asynchronous connections of the mentioned climatic parameters with data on space factors are determined. They proved to be a useful addition to asynchronous connections with ocean surface temperature. The informativeness of the predictors was evaluated by the calculated coefficients of determination. The combined influence of different factors was generalized in the equation of multiple asynchronous correlation.

Asynchronous regression relations based on inertial relationships of three-year-smoothed average monthly air temperature and precipitation with the known changes in ocean surface temperature in the grid nodes in the past and with other predictors, allow the estimates of smoothed changes in temperature and precipitation to be obtained for 10 and 20 years at about half of all Russian stations. Such successful areas include territories located in the zone of the greatest influence of the Atlantic, Pacific and possibly Indian Oceans.

Keywords: climate change, air temperature, precipitation, forecast, trend.

Fig. 6. Tab. 6. Ref. 8.

UDC 551.465.7

The Cyclone Activity Monitoring in the North Atlantic Based on ESIMO Indicators. Viazilova N. A. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 88 – 98.

Monitoring of cyclonic and storm activity in the North Atlantic and Europe, including the European territory of Russia, is carried out within the framework of the applied task of the Unified System of Information on the Situation in the World Ocean (ESIMO) and includes monthly calculation of cyclone activity indicators, presentation of indicators values on the ESIMO portal in the form of information resources, and construction of maps of spatial distribution and graphs of temporary changes in indicator values using interface tool.

Keywords: ESIMO applied task, cyclonic activity monitoring.

Fig. 4. Ref. 5.

UDC 551.465.7

Cyclonic activity and atmospheric circulation oscillations in the North Atlantic based on reanalysis ERA5. Viazilova N.A., Viazilov A.E. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 99 – 110.

The study shows the analysis of the features of the spatial distribution of climatic characteristics of cyclonic activity in the North Atlantic and the European region in the winter season, as well as the relationship of the interannual variability of cyclonic activity with the North Atlantic and East Atlantic oscillations of large-scale atmospheric circulation. The analysis was performed based on reanalysis ERA5/ECMWF for 42 winter seasons for the period 1979–2021.

Keywords: cyclonic activity, atmospheric circulation.

Fig. 4. Tab. 1. Ref. 9.

UDC 551.465

Salinity Regime of the Black Sea in the Last Five Years. Vorontsov A.A., Batalkina S.A., Bulygin A.M., Nefedova G.I. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 111 – 120.

The article considers the characteristics of changes in the salinity regime of sea water in the recent years in the Black Sea. Comparative estimates of salinity for the modern climatic period and for the last five years are given. Positive trends in the sea water salinity regime are shown, both in the coastal zone in the Russian sector of the Black Sea, and in the sea as a whole.

Keywords: Black Sea, marine climate, regime of hydrometeorology, sea water salinity, oceanography, hydrometeorological station.

Fig. 7. Tab. 1. Ref. 5.

UDC 551.465

Changes in the Thermal Regime of the Active Layer of the Black Sea. Vorontsov A.A., Batalkina S.A., Nefedova G.I. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 121 – 130.

The article considers the characteristics of changes in the salinity regime of the sea water in the Black Sea in the recent years. Comparative estimates of sea water temperature for the modern climatic period and for the last five years are given. Positive trends in the sea water thermal regime are shown, both in the coastal Black Sea zone and in the Sea as a whole.

Keywords: Black Sea, marine climate, regime of hydrometeorology, sea water temperature, oceanography, hydrometeorological station.

Fig. 4. Tab. 6. Ref. 5.

UDC 551.465

Trends in the Black Sea Water Density in the Modern Period. Vorontsov A.A., Nefedova G.I., Batakina S.A. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 131 – 145.

The article considers the characteristics of changes in the density regime of the active layer in the Black Sea for the modern period (1980–2022). Estimates of the sea water density are given for the climatic period 1990–2020 and for the last five years. Tendencies of changes in sea water density regime are shown both in the coastal zone and in the Black Sea area as a whole.

Keywords: Black Sea, marine climate, regime of hydrometeorology, sea water density, oceanography, hydrometeorological station.

Fig. 17. Tab. 4. Ref. 8.

UDC 551.582.2

On 21-year Variations of Air Temperature. Molodykh V.A. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 146 – 158.

An analysis of the series of January air temperatures at 15 long-series stations in Japan using low-frequency digital filtering showed the presence of stable fluctuations with a characteristic duration corresponding to the duration of a double solar cycle (21 years) for the southern and central regions of the considered territory.

The range of temperature fluctuations in the specified cycle is 1.0–1.5 °C. The maxima of temperature fluctuations in the 21-year cycle are observed 1–5 years after the maxima of the double solar cycle, that is, after the maxima of even 11-year cycles.

Keywords: air temperature, solar activity, 21-year cycle.

Fig. 2. Tab. 3. Ref. 7.

UDC 551.524.77

Trends in Tropopause Characteristics from Radiosonding Data in the Arctic Region. Kozlova L. F. Proceedings of RIHMI-WDC. 2023. N 191. P. 159 – 166.

The article presents the results of studying the temporal variability of the tropopause characteristics in the Arctic region in different seasons for the period 1978–2022. The trends of monthly anomalies of height, temperature and pressure at the level of the lower border of the tropopause (polar) are analyzed according to thirty-nine aerological stations located on the territory of the Russian Federation. Statistically significant positive values of geopotential height trends at the level of the lower tropopause boundary are recorded for most of the stations considered. The results of calculations are presented and discussed.

Keywords: aerological observations, tropopause, climate, trends, Arctic region, radiosonde data.

Fig. 2. Tab. 1. Ref. 17.

Сборник научных трудов

Труды ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Выпуск 191

Подписано к печати 20.11.2023 г. Формат 60×84/16.

Печать офсетная. Печ. л. 10,46. Тираж 300 экз. Заказ № 33.

Отпечатано в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», г. Обнинск, ул. Королёва, 6.

