

УДК 550.338

ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛН ЖАРЫ ПЛАНЕТАРНЫМИ ВОЛНАМИ РОССИИ**М.Л. АРУШАНОВ***

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, mikl-arushanov@rambler.ru

Аннотация. Наблюдаемый положительный тренд температуры и связанный с ним рост частоты и интенсивности волн жары, обусловлен собственным колебанием атмосферы второго рода (волнами Россби), точнее говоря, взаимодействием волн Россби с струйными течениями. На широтах Центральной Азии циркумглобальные волны Россби связаны с сильно извилистым струйным течением и могут вызывать одновременные волны тепла и наводнения не только в данном регионе, но и по всему северному полушарию.

В данной статье приводится обзор работ посвящённых исследованию волн жары, генерируемой волнами Россби из-за торможения западного переноса с образованием омега-блокинга (процесс блокирования), вызывающий значительное потепление в одних областях региона и наводнения в соседних областях.

Получены характерные длины волн Россби в январе и июле для северного и южного полушарий планеты. Показано, что уравнение планетарных волн, полученное Россби, применимо только к гармоническим волнам, распространяющихся без изменения формы в линейных средах. Поскольку процессы взаимодействия волн Россби с струйными течениями существенно нелинейные, фазовая скорость волны есть функция частоты, т.е. определяющим является дисперсия скорости, а значит необходимо рассматривать групповую скорость и скорость фронта волны. Представлено уравнение дисперсии гравитационно-гироскопических волн, в высокочастотной области спектра выражающее закон дисперсии гравитационно-гироскопических волн, а в низкочастотной – закон дисперсии волн Россби.

Ключевые слова: волны Россби, струйное течение, волны тепла, омега-блокинг, западный перенос, дисперсионное уравнение.

Введение. Волны жары – это устойчивые периоды в несколько дней с температурой воздуха, превышающей её норму в данном географическом районе.

Волны жары в масштабе синоптических процессов возникают в результате формирования в атмосфере малоподвижной тёплой воздушной массы, как естественное явление атмосферных процессов. Увеличение (уменьшение) частоты возникновения волн жары связано с состоянием климатической системы, динамике которой свойственна цикличность с периодами колебаний от нескольких лет до десятилетий, столетий и тысячелетий [Арушанов, 2023]. Оценка европейского климата [Klein T. et al., 2002] подтверждает, что, например, Европа за последние десятилетия переживает беспрецедентные темпы потепления.

Одновременные экстремальные метеорологические явления в различных областях планеты потенциально представляют высокие риски для здоровья человека. Глобальные волны Россби связаны с сильно извилистым струйным течением и могут вызывать одновременные волны тепла и наводнения на огромных территориях.

Экстремальные погодные явления оказывают негативное воздействие на экономику и, в целом, на все социальные сферы. Их синхронность проявления в отдельных областях планеты приводит к тенденции обострения явлений. Динамика погоды, контролируемая, в частности, динамикой струйных течений и его

* Ответственный автор: mikl-arushanov@rambler.ru, тел.: +998 90 997-61-46

взаимодействием с циклонами и антициклонами, приводит к ковариабельности (общей изменчивости) погоды на территориях регионального масштаба. Когда циркуляционные характеристики ослабевают с запада на восток и в струе развиваются крупные меандры с севера на юг амплитуда волн Россби значительно увеличивается и, как следствие, увеличивается эффект их воздействия на погоду [Kornhuber. et al, 2017; Petoukhov, 2013].

Целью работы является исследование географического распределения волн жары на планете, выявление закономерностей этого распределения, исследование пространственного спектра колебаний волн Россби в январе и июле в северном и южном полушариях.

Используемые данные. Для получения спектра колебаний планетарных волн Россби были использованы данные реанализа ERA5 *ECMWF* геопотенциала 500 гПа по кругам широты с шагом сетки 2,5×2,5 градуса за период 1948-2023 годы. За указанный период было выполнено осреднение этих данных по кругам широты в каждом узле долготно-широтной сетки с шагом 2,5 градуса. Таким образом для каждого круга широты было получено в 144 узлах среднезональное значение \overline{H}_{500} – матрица размером 144×73 (включая северное и южное полушарии).

Методы исследования. Для реализации поставленной цели были использованы методы спектрального анализа, основанные на вейвлет преобразовании заданного ряда физической величины (в нашем случае геопотенциала на поверхности 500 гПа), приводящего к двумерному распределению спектра колебаний (амплитудная вейвлет функция) и интегральному спектру энергии (скейлограмма) [Арушанов, 2015]. Аналитическое выражение для дисперсии волн в атмосфере получено на основании теории мелкой воды [Гольдштейн, 2000; Ляпидевский, Тешуков, 2000].

Волны жары на планете. Период 1986 по 2024 годы характеризуется ежегодным числом экстремально высоких температур. Необходимо отметить, что за этот период величина повышения минимальных (ночных) температур оказывается больше величины повышения дневных температур, а также, что за последние 100 лет в глобальном масштабе наблюдалась тенденция к более высоким температурам, но эта тенденция была неустойчивой. Начиная с 1986 года тренд температуры почти в три раза превышает тренд за последние сто лет (рис. 1) в целом [Arushanov, 2023], а первое двадцатилетие XXI века является самым тёплым за всё время инструментальных наблюдений.

На рис. 1 можно видеть, что в Северном полушарии, начиная с 1995 года, рост температуры близок к экспоненциальному. В этом отношении 2024 год с момента инструментальных наблюдений побил все температурные максимумы, хотя он ещё не закончился. На рис. 2 показано географическое распределение аномалии среднесуточной температуры на европейской части континента в июле 2024 года, а на рис. 3 – по всей планете.

На европейском континенте среднемесячная температура превысила её норму на 2-4°C (рис. 2). В странах средиземноморья приземная температура достигала 40-44°C. Устойчивые волны жары в отсутствие осадков явились причиной многочисленных пожаров. Исключение не составил и французский курорт Биарриц с мягким прохладным климатом на берегу Бискайского залива. Здесь температура воздуха поднималась почти до 43°C, что было зафиксировано впервые. Максимумы температуры за время инструментальных наблюдений были впервые зафиксированы в Боснии и Хорватии, от южной Франции до северного Шпицбергена (рис. 3).

В целом в подавляющей части северного полушария, начиная с конца прошлого столетия, среднегодовая температура воздуха выше нормы относительно базового периода 1960-1990 годы. Сказанное можно видеть на рис. 4а для июля 2024 года.

Исключение составляет Индия и океанические акватории (широты субтропического кольца повышенного давления на поверхности 500 гПа – рис. 4b), как следствие, воздействия на атмосферу функционирующего в настоящее время Ла-Нинья, приносящая относительную прохладу в эти области.

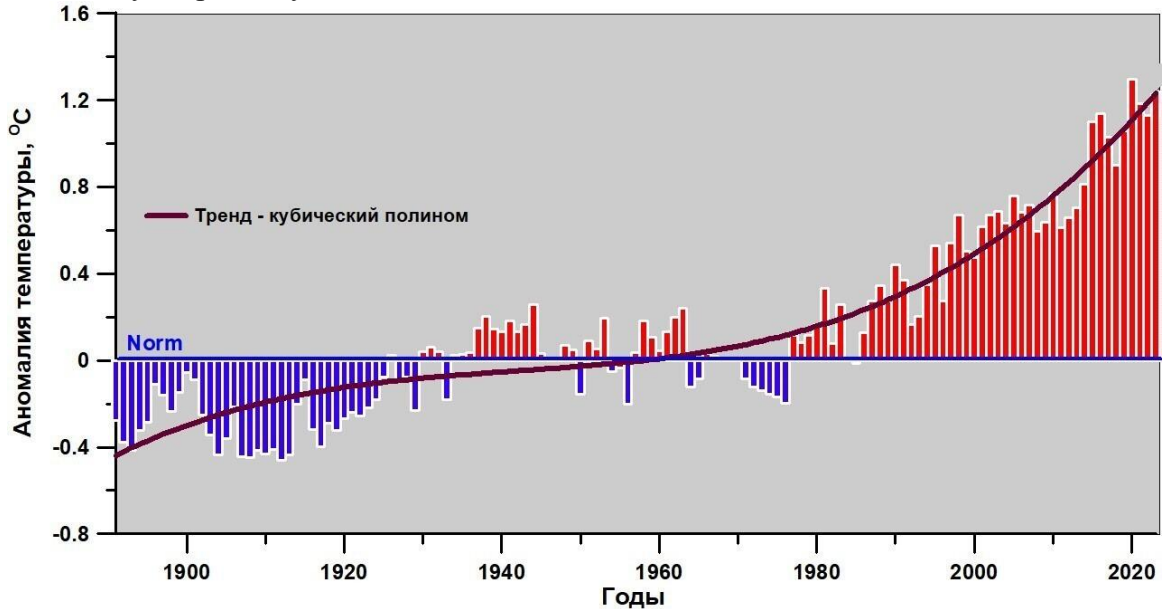


Рис. 1. Динамика аномалии среднегодовой температуры воздуха в Северном полушарии в период 1890-2023 гг.

Fig. 1. Dynamics of the anomaly of average annual air temperature in the Northern Hemisphere for the period 1890-2023

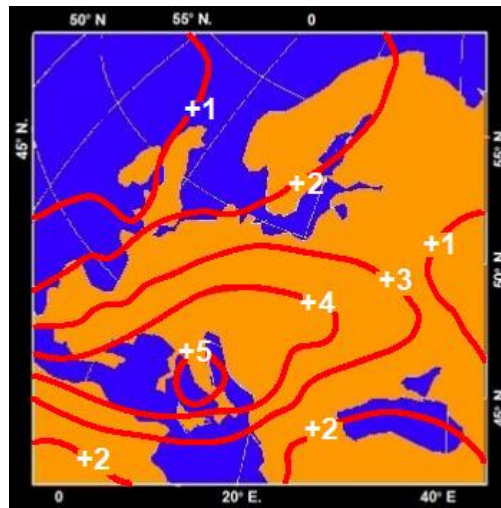


Рис. 2. Аномалия среднесуточной температуры воздуха на европейской части Северного полушария в июле 2024 года

Fig. 2. Anomaly of average daily air temperature in the European part of the Northern Hemisphere in July 2024

Таким образом, на основании представленных на рис. 2-4 распределений аномалий приземной температуры следует, что наиболее интенсивные и продолжительные волны

жары зафиксированы в Северном полушарии, в частности, на западе и северо западе США (в долине Смерти температура превысила 50°C), в Китае на многих метеостанциях зафиксированы рекордные температуры, также был побит температурный исторический максимум в Испании, на Каймановых островах.

В Южном полушарии волны жары проявляются не так активно, как в Северном полушарии, хотя исключительно высокие температуры наблюдались в юго-западной части Австралии, юге Африки и Латинской Америки (рис. 3).

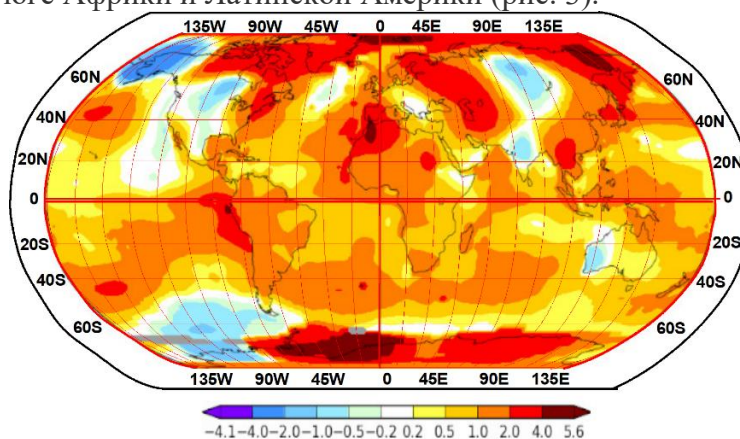


Рис. 3. Аномалия приземной температуры воздуха на планете по данным реанализа ERA5 ECMWF в июле 2024 г. относительно базового периода 1991-2020 гг.

[<https://www.kp.ru/family/ecology/izmenenie-klimata/>]

Fig. 3. Anomaly of surface air temperature on the planet according to the ERA5 ECMWF reanalysis data in July 2024 relative to the base period 1991-2020

[<https://www.kp.ru/family/ecology/izmenenie-klimata/>]

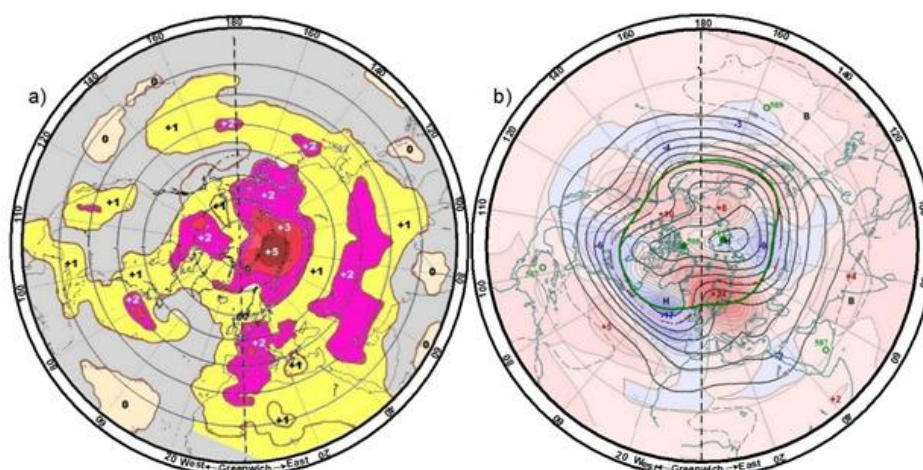


Рис. 4. Аномалия температуры воздуха в Северном полушарии в июле 2024 года (a); климатическое поле давления поверхности 500 гПа (b)

Примечание: субтропическое кольцо повышенного давления выделено синим цветом;
— климатическое положение планетарной фронтальной зоны.

Fig. 4. Air temperature anomaly in the Northern Hemisphere in July 2024 (a); climatic field of surface pressure at 500 hPa (b)

Note: the subtropical ring of high pressure is highlighted in blue;
— climatic position of the planetary frontal zone.

Различие в проявлении интенсивности и географическим захватом волн жары в обеих полушариях объясняется очевидной причиной, а именно, водная поверхность в Северном полушарии занимает 61% поверхности земного шара, а в Южном полушарии – 81%. Как не раз было указано [Арушанов, 2023], что климатическую систему, включающую внутренние и внешние факторы, необходимо рассматривать как открытую термодинамическую систему, в которой одной из составляющих является океан. Океан генерирует более 50% кислорода в атмосфере Земли и более 90% энергии, генерируемой человечеством за счёт излишков избытков в выбросах углекислого газа, аккумулируется в океане. Большая консервативность океана по отношению к атмосфере является важнейшим фактором в долгопериодных климатических изменениях. Иначе говоря, теплоёмкость морской воды почти в четыре раза больше теплоёмкости воздуха, т.е. океану требуется в несколько тысяч раз больше времени, чем атмосфере для изменений своего термического состояния. Вследствии наблюдаемого положительного тренда температуры воздуха более 90% дополнительной энергии поглощается океаном, увеличивая его теплосодержание, а это значит, что не менее важным фактором, а по существу, главнейшим, чем «волны жары» являются «волны океанического тепла», получившие специальное название «*global warming is the ocean warming*». В настоящее время (2000-2020 годы) дисбаланс приходящей радиации и уходящей коротковолновой и длинноволновой радиации составляет $0,9 \text{ Вт/м}^2$, в то время как за период 1970-1990 годы эта величина составляла $0,25 \text{ Вт/м}^2$. Таким образом, накапливаясь в климатической системе, избыток тепловой энергии поддерживает наблюдаемое глобальное потепление, а вместе с тем увеличивает частоту и интенсивность волн жары. Наиболее точная оценка дисбаланса в будущем является ключевой в рамках оценки изменений климатической системы. Важно отметить, что нагревание океана, проявляющееся в увеличении его теплосодержания, продолжается и тогда, когда тренд температуры воздуха становится нулевым или даже тогда, когда он меняет знак.

В докладе UNESCO «*State of the World Ocean in 2024*» отмечено, что темпы потепления океана ускорились в два раза за последние 20 лет – температура океана выросла в среднем на $1,45^\circ\text{C}$, причём в Средиземном море, тропической части Атлантического океана и Южных океанах потепление выросло выше 2°C и, как следствие, увеличился уровень океана (40% глобального подъёма уровня моря происходит из-за потепления океана).

Подъём уровня океана, помимо его расширения за счёт глобального потепления, происходит в результате таяния ледников Арктики, Гренландии и Антарктиды. Если обратиться к рис. 3, то отчётливо видно, что максимальные положительные аномалии температуры воздуха сосредоточены в Антарктиде ($+12^\circ\text{C}$), высокие аномалии в Гренландии ($+5^\circ\text{C}$). Однако здесь таяние происходит не только «сверху» вызванное глобальным потеплением, но и «снизу» – за счёт геотермального тепла. Повышенная активность геотермального тепла вызвано усилением восходящих движений магмы, как следствие диссонанса ядра Земли [Арушанов, 2023].

На рис. 5 представлена аномалия температуры поверхности мирового океана относительно базового климатического периода 1991-2020 гг. Аномалия температуры большей части водной поверхности выше нормы, достигая рекордных значений около 5°C . При этом, если, например, в XIX веке рекордные показатели аномалии температуры мирового океана были около 2%, в настоящее время эта цифра достигла 57% мировых вод.

Генерация волн жары волнами Россби. Волны Россби в атмосфере – это результат сдвига вихревых потоков под воздействием силы Кориолиса $F_k = 2\omega v \sin(\varphi)$

(ω – угловая скорость вращения Земли, v – скорость ветра, φ – широта), являющейся функцией широты [Rossby, 1939; Rossby, 1940]. Глобальные волны Россби, взаимодействуя со струйными течениями при определённой атмосферной циркуляции, вызывают волны тепла в одних областях планеты и наводнения в других по всему северному полушарию [Teng et al., 2013; Schubert et al., 2014; Kornhuber et al., 2017; Coumou et al., 2014]. В среднестатистических условиях волны Россби, например, в летнее время, проходят Евразию за четыре-пять дней.

Однако, когда фронтальное воздушное движение блокируется, т.е. нарушаются среднестатистические условия, возникают очаги высокого устойчивого давления (антициклоны) с знойным неподвижным воздухом, образуя волны жары.

Струйное течение и вихри Россби являются генераторами перемещения барических образований. Скорость движения вихрей зависит от величины градиента температуры между Северным полюсом и территориями с умеренным климатом. Если эта величина незначительная, то вихри замедляются или же вовсе останавливаются. Устанавливается стабильная антициклональная погода, приводящая, например, в Центральной Азии к жаре и засухе.

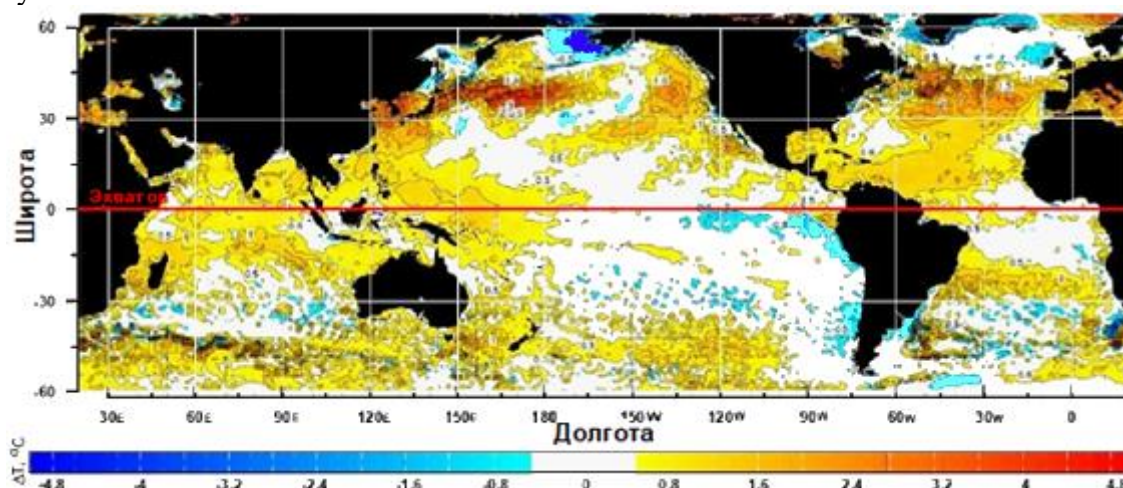


Рис. 5. Аномалия температуры океана (август 2024 года)

[<https://www.ospo.noaa.gov/data/sst/anomaly/2019/anomnight.8.8.2019.gif>]

Fig. 5. Ocean Temperature Anomaly (August 2024)

[<https://www.ospo.noaa.gov/data/sst/anomaly/2019/anomnight.8.8.2019.gif>]

Волны Россби, как и любые волны в физике, имеют свой спектр колебаний от низкочастотной области до высокочастотной. Каждая область колебаний определяется своим волновым числом k :

$$k = \frac{w}{v} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

где: w – циклическая частота, v – скорость волны; λ – длина волны, а волновое уравнение планетарных волн Россби [Rossby, 1939] представил в виде

$$C_f = wt - kx = U - \frac{1}{4\pi^2} l\lambda^2, \quad (1)$$

где: C_f – фазовая скорость волны; U – фоновый ветер запад-восток; $l=2w \cdot \sin\varphi$ – параметр Кориолиса; φ – широта; t – время; x – координата перемещения (одномерный случай).

Простое уравнение (1) применимо только к гармоническим волнам, распространяющихся без изменения формы в линейных средах. В противном случае C_f есть функция частоты (длины волны), т.е. вступает в силу дисперсия скорости. Тогда имеет место групповая скорость и скорость фронта волны.

При больших числах Рейнольдса в атмосфере турбулентное движение является причиной генератора вихрей и зональных течений. Движение в таких условиях согласно теореме Тейлора-Праудмена* [Гольдштейн, 2014] представляет наложение двумерного движения в плоскости, перпендикулярной оси вращения, и однородного движения вдоль оси вращения. Поскольку синоптические масштабы движения значительно превышают всю толщу атмосферы, то принимая приближение линейного роста силы Кориолиса вдоль меридиана (в приближение β -плоскости), возможно описывать синоптическое движение в виде волн.

Таким образом, физическая природа волн Россби, находящихся под воздействием преобладающей силы Кориолиса, обусловлена значительными масштабами L по осям X , Y и малым числом Кибеля-Россби.

В рамках теории мелкой воды получено уравнение [Ляпидевский, Тешуков, 2000], описывающее дисперсию волн в атмосфере, во вращающейся вместе с Землёй локальной декартовой системой координат:

$$w = \left(w^2 - 4\Omega_z^2 - \mathbf{k}_\perp^2 c_3^2 \right) - \frac{2k_x \Omega_y}{R} c_3^2 = 0, \quad (2)$$

где: Ω_z – проекция скорости вращения системы на местную вертикаль; Ω_y – проекция скорости вращения системы на меридиан; c_3 – адиабатическая скорость звука, R – радиус планеты; $\mathbf{k}_\perp = k_x^2 + k_y^2$, k_x – волновое число вдоль широты; k_y – вдоль меридиана.

Решение уравнения (1) в высокочастотной области спектра представляет собой закон дисперсии гравитационно-гироскопических волн, а в низкочастотной – закон дисперсии волн Россби:

$$w_R = - \frac{2k_x \Omega_y}{R \left(\mathbf{k}_\perp^2 + \frac{4\Omega_z^2}{c_3^2} \right)}. \quad (3)$$

При выполнении условия $L \geq r_R = \frac{c_3}{2\Omega_z}$ (режим Россби с учётом дозвуковых скоростей) вращение системы существенно влияет на динамику и свойства волновых структур. Типичным результатом этого влияния является процесс блокирования, вызывающий жару и засуху в одном регионе и обильные осадки в соседних областях.

Процесс «блокировки» – малоподвижная область высокого давления, называемая «омега» (рис. 6), как отмечалось выше, возникает по причине торможения волн Россби.

С повышением глобальной температуры интенсивность и продолжительность волн жары возрастает. В цикле работ [Kornhuber et al., 2017; Kornhuber et al., 2019; Kornhuber et al., 2020; Mancini, 2022] показано, что из набора составлявших волн Россби с различными волновыми числами наиболее стабильными оказываются волны с волновыми числами 5 и

* Согласно теореме Тейлора-Праудмена из-за вращения твёрдого ядра скорость потоков постоянна вдоль вертикальной оси образующихся таким образом столбов Тейлора, заключённых внутри цилиндра, ограничивающего внутреннее ядро, и подобных циклонам и антициклонам в атмосфере Земли.

7, приводящие к установлению жары в одних областях и наводнений в соседних. Очень важным результатом этих работ является полученное на строгом уровне с использованием модели ECA** (event-condition-action) [Donges et al., 2016] одновременность событий волн жары в нескольких регионах (рис. 7).

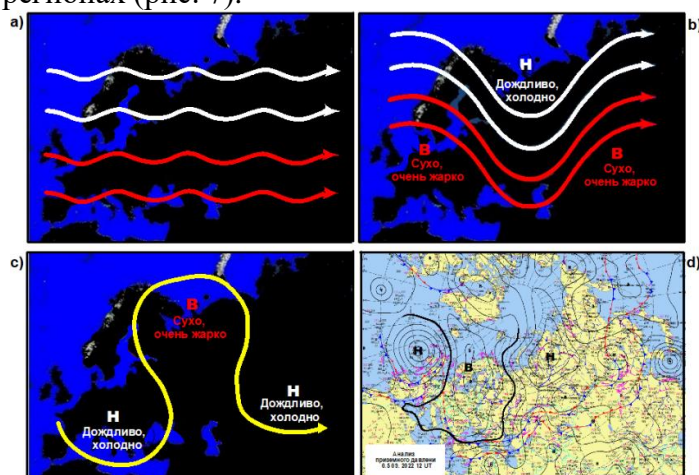


Рис. 6. Схемы западного переноса (а), торможения западного переноса (b), омега-блокировки (с) и процесс «омега-блокировка» на приземной карте давления 05.09.2022 (d), вызвавший жару на европейской территории России

Fig. 6. Schemes of westerly transport (a), braking of westerly transport (b), omega-blocking (c) and the “omega-blocking” process on the surface pressure map of 05/09/2022 (d), which caused heat in the European territory of Russia

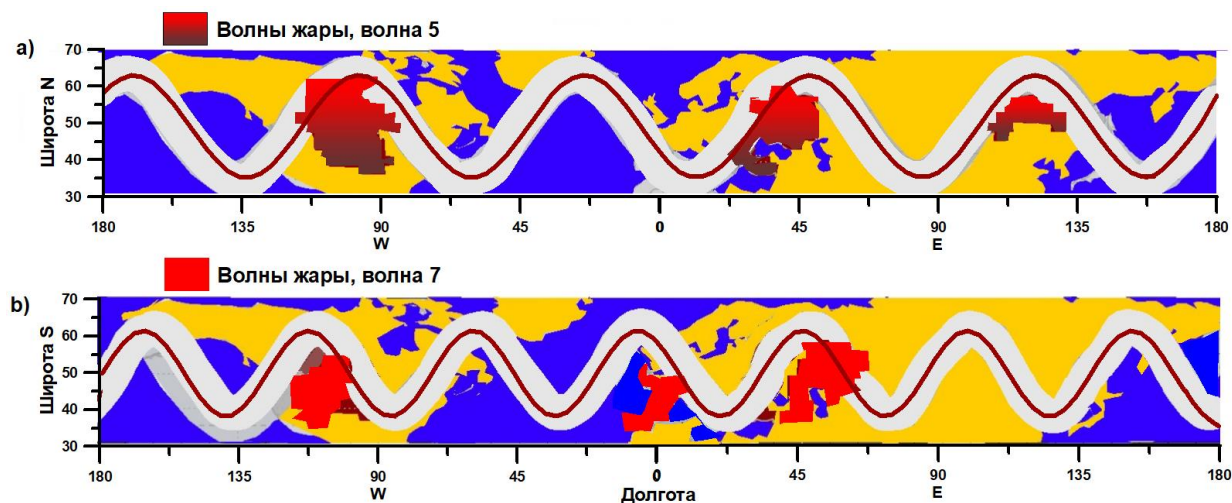


Рис. 7. Временная синхронизация волн жары в различных регионах планеты северного полушария, генерируемых волной 5 (a) и волной 7 (b) [Kornhuber et al., 2020]

Fig. 7. Temporal synchronization of heat waves in different regions of the planet in the northern hemisphere, generated by wave 5 (a) and wave 7 (b) [Kornhuber et al., 2020].

** Модель, позволяющая диагностировать одновременность возникновения различных процессов по определённому заданным правилам.

Спектр колебаний волн Россби. Уравнение (3) даёт теоретическое распределение волн по частотам от высокочастотной области спектра (гравитационно-гироскопические волны) до низкочастотной (волны Россби). Экспериментальный спектр волн Россби можно получить, рассматривая, например, поля геопотенциала поверхности 500гПа. В данной работе был использован этот подход. Для этого использовались по всей планете данные реанализа ERA5 ECMWF в узлах долготно-широтной сетки с шагом 2,5×2,5 градуса за период 1948-2023 годы. Для каждого круга широты за указанный период было выполнено осреднение значений H_{500} в каждом узле сетки (рис. 8).

Как следует из рис. 9 в спектре колебаний волн Россби в Северном и в Южном полушариях в январе и июле наблюдаются максимумы в высокочастотном и среднечастотном диапазонах и максимум в низкочастотной области спектра. При этом длины волн одинаковые для Северного и для Южного полушарий и, по-видимому, сохраняются в течении года (табл. 1).

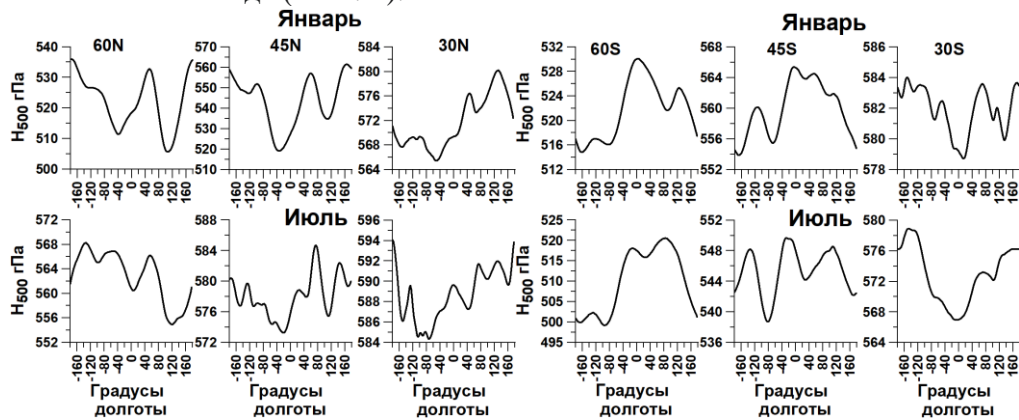


Рис. 8. Среднезональное распределение геопотенциала H_{500} в Северном и Южном полушариях планеты в январе и июле

Fig. 8. Average zonal distribution of the H_{500} geopotential in the Northern and Southern hemispheres of the planet in January and July

Интегральный вейвлет спектр волн Россби представлен на рис. 9.

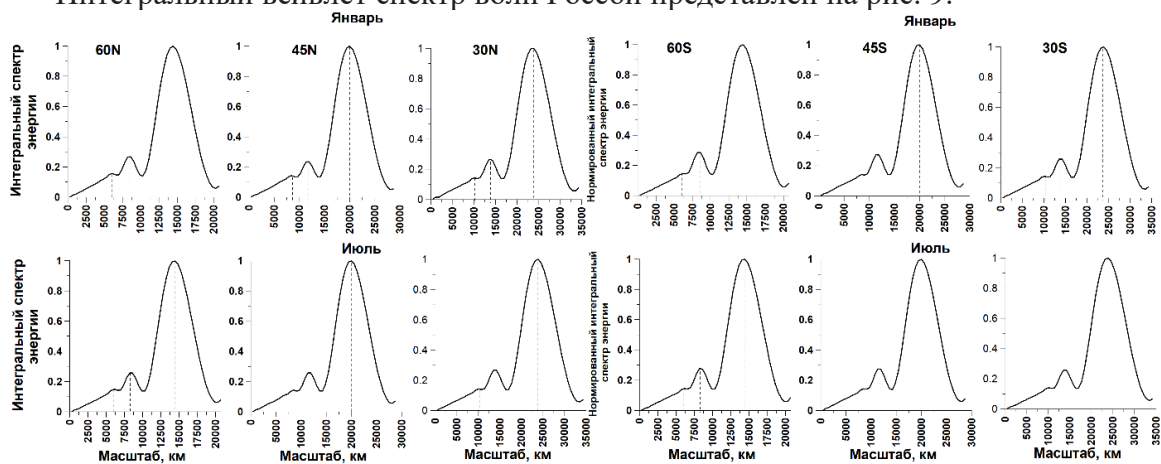


Рис. 9. Интегральный вейвлет спектр среднезональных значений геопотенциала H_{500} в январе и июле в Северном и Южном полушариях

Fig. 9. Integral wavelet spectrum of zonal average values of the H_{500} geopotential in January and July in the Northern and Southern Hemispheres

Устойчивость волн Россби с соответствующими длинами волн по мере их перемещения по кругу широты с запада на восток наглядно показана на рис. 10 для Северного полушария, где приведены амплитудные вейвлет функции, построенные для 60° с.ш, 45° с.ш и 30° с.ш. Совершенно аналогичные амплитудные вейвлет функции для Южного полушария, что собственно следует из таблицы 1 и рис. 9.

Таблица 1

Длины волн Россби

Table 1

Rossby wavelengths

Месяц	Северные и южные широты, град.					
	60		45		30	
	Масштаб					
	Длина волны, км		Длина волны, км		Длина волны, км	
	Высокие и средние частоты	Низкие частоты	Высокие и средние частоты	Низкие частоты	Высокие и средние частоты	Низкие частоты
Январь	6250 8250	14375	8750 14000	20000	1000 13850	28750
Июль	6250 8250	14375	8750 14000	20000	1000 13850	28750

Таким образом, по мере движения с запада на восток планетарные Волны Россби в области средних и высоких частот остаются стабильными по всей длине круга широты, а на высоких частотах имеют тенденцию симметричного, относительно средней величины масштаба, смещения в область более низких частот (рис. 10).

Заключение. Наблюдаемое с нарастающей интенсивностью с 1998 года глобальное потепление, главным образом вызванное влиянием внешнего (галактического) циклического фактора с периодом 1200 лет, уменьшило контраст температуры между Арктикой и тропиками, ослабив западный перенос. Тем самым активизировало взаимодействие волн Россби со струйным зональным течением, результатом которого является повышение частоты и интенсивности крупномасштабных аномалий общей циркуляции атмосферы, таких как блокирующие антициклоны (атмосферные блокинги), способствующие возникновению погодных экстремумов (волн жары, наводнений).

Таким образом, характерной особенностью волн Россби является их самоорганизация, генерирующая крупномасштабные вихри и зональные ветры.

Интенсивные, с растущей продолжительностью волны тепла, становятся трендом на планете. Охватывая регионы планеты, волны тепла создают много проблем не только в настоящем, но и в будущем, создавая засухи и с ними неурожаи, участвовавшие пожары на огромных территориях, ставшие летней нормой.

Автор прочитал и согласен с подготовленной к публикации версией рукописи.

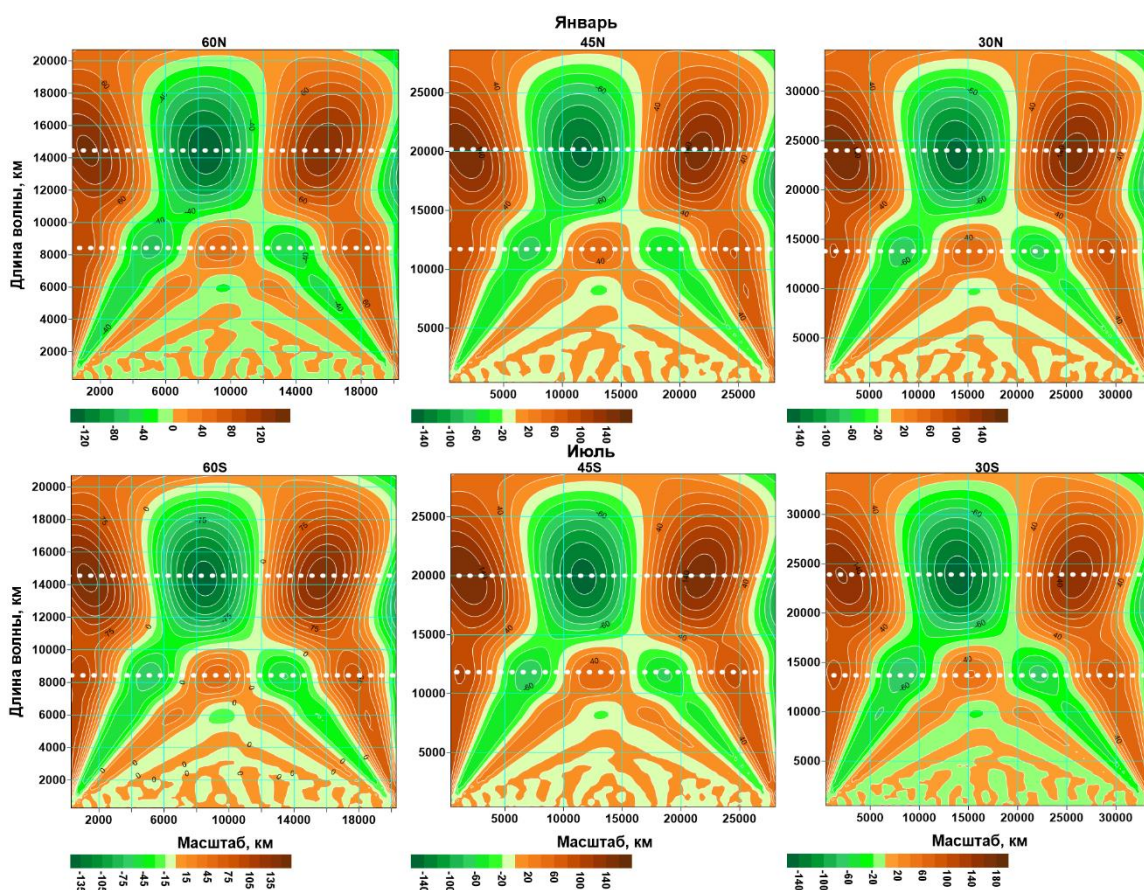


Рис. 10. Амплитудная вейвлет функция среднезонального геопотенциала H_{500} для Северного полушария

Примечание: белые пунктирные линии – показатель устойчивости волн по мере их продвижения по кругу широты на данной частоте (длине волны).

Fig. 10. Amplitude wavelet function of the zonal average geopotential H_{500} for the Northern Hemisphere

Note: white dotted lines are an indicator of the stability of waves as they move along the circle of latitude at a given frequency (wavelength).

ЛИТЕРАТУРА

Арушанов М.Л. Практические вопросы использования вейвлет преобразования в метеорологии. – Ташкент: НИГМИ, 2015. – 41 с.

Белоненко Т.В., Новоселова Е.В. Методы оценки бароклинного радиуса деформации Россби. – С-Пб.: Государственный университет. – 2019. – 25 с.

Гольдштейн Р. В., Городцов В. А. Механика сплошных сред. Часть 1. – М.: Наука, 2000. – 256 с.

Ляпидевский В.Ю., Теушков В.М. Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости. – Новосибирск: Сибирское отделение Академии наук РФ. – 2000. – 419 с.

Arushanov M.L. Climate dynamics. Space factors. – Hamburg: LAMBERT Academic Publishing, 2023. – 144 p.

Coumou D., Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S. & Schellnhuber H.J. Quasiresonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer / Proc. Natl Acad. Sci. USA 111. – 2014, 12331–12336.

Donges J., Schleussner C.F., Siegmund J.F. & Donner R.V. Event coincidence analysis for quantifying statistical interrelationships between event time series // Eur. Phys. J. Spec. Top. 225. – 2016. – PP. 471-487.

Kornhuber K., Coumou D., Vogel E., Lesk C., Donges J.F., Lehmann J. and Horton R.M. Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions // Nature Climate Change, vol 48. – 2020. – PP. 48-53.

Kornhuber K. et al. Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern. Environ // Res. Lett. 14. –2020. – PP. 1-7.

Kornhuber K. et al. Summertime planetary wave-resonance in the northern and southern hemisphere // J. Clim. N30. – 2017. – PP. 6133-6150.

Kornhuber K., Petoukhov V., Petri S., Rahmstorf S. & Coumou D. Evidence for wave resonance as a key mechanism for generating highamplitude quasi-stationary waves in boreal summer // Clim. Dynam. 49. – 2019.

Osman M. B., Coatsc S., Dasd S.B., McConnell J.R. and North N.C. Atlantic jet stream projections in the context of the past 1250 years // PNAS, v. 118, No. 38. – 2021. – P. 1-7.

Palmen E., Newton C. Circulation systems of the atmosphere. – L.: Gidrometeoizdat, 1973. – 375 p.

Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S. & Schellnhuber H.J. Quasiresonant amplification of planetary waves and recent northern hemisphere weather extremes // Proc. Natl Acad. Sci. USA 110. – 2013. – PP. 5336–5341.

Rossby C.-G. Planetary flow patterns in the atmosphere, Quart. // J. Royal Meteorological Society. 1940. V. 66. – PP. 68–87

Rossby C.-G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacement of the semi-permanent centers of action // J. Marine Research. 1939. V. 2. – PP. 38–55.

Schubert S.D., Wang H., Koster R.D., Suarez M.J. & Groisman P.Y. Northern Eurasian heat waves and droughts // J. Clim. 27. 2014. – PP. 169-207.

Teng H., Branstator G., Wang H., Meehl G.A. & Washington W.M. Probability of US heat waves affected by a subseasonal planetary wave pattern // Nat. Geosci. 6. - 2013. – PP. 1056–1061.

Electronic resources:

Mancini M. Rossby waves affect our weather and tides, but what are They? URL: <https://science.howstuffworks.com/environmental/earth/geophysics/rossby-waves.htm>, 2022.

Trouet V. et al. Jet stream controls on European climate and agriculture since 1300 ce. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07985-x>

ПЛАНЕТАР РОССБИ ТЎЛҚИНЛАРИ ОРҚАЛИ ИССИҚЛИК ТЎЛҚИНЛАРИНИНГ ГЕНЕРАЦИЯСИ

М.Л. АРУШАНОВ

Гидрометеорология илмий-тадқиқот институти, mikl-arushanov@rambler.ru

Аннотация. Кузатилаётган ҳароратнинг мусбат тренди ва у билан боғлиқ иссиқлик тўлқинларининг частотаси ва интенсивлигининг ортиши, иккинчи турдаги атмосферанинг табиий тебранишларига (Россби тўлқинларига) боғлиқ, аниқроғи, Россби тўлқинларининг найсимон оқимлари билан ўзаро таъсири натижасида юзага келади. Ўрта Осиё кенгликларида циркумглобал Россби тўлқинлари ўта айланма найсимон оқим билан боғлиқ бўлиб, нафақат бу минтақада, балки бутун шимолий ярим шарда бир вақтнинг ўзида иссиқлик тўлқинлари ва сув тошқинларини келтириб чиқариши мумкин.

Ушбу мақолада Россби тўлқинлари туфайли гарбий ҳаво оқимининг секинлашиши ва омега-блокинг (блокировка(ўтқазмаслик) жараёни) ҳосил бўлиши билан боғлиқ минтақанинг айрим ҳудудларида сезиларли исийи ва қўшни ҳудудларда сув тошиқини келтириб чиқарадиган жараёнларнинг ўрганилишига бағишланган ишларни шарҳи келтирилган.

Январь ва июль ойларида сайёрамизнинг шимолий ва жанубий ярим шарлари учун характерли Россби тўлқин узунликлари келтирилган. Сайёравий тўлқинлар учун Россби тенгламаси фақат чизиқли муҳитда шаклини ўзгартирмасдан тарқаладиган гармоник тўлқинларга тегишлилиги кўрсатилган. Россби тўлқинларининг найсимон оқимлари билан ўзаро таъсири жараёнлари сезиларли даражада чизиқли бўлмаганлиги сабабли, тўлқиннинг фаза тезлиги частотанинг функциясидир, яъни тезлик дисперсияси ҳал қиладиган омил бўлади ва, демак, гуруҳ тезлиги ва тўлқиннинг фронтал тезлигини ҳисобга олиши керак. Гравитацион-гироскопик тўлқинларнинг дисперсия тенгламаси келтирилган, бу тенглама спектрнинг юқори частотали қисмида гравитацион-гироскопик тўлқинларнинг дисперсия қонунини, қуйи частотали қисмида -Россби тўлқинларнинг дисперсия қонуни ифодалайди.

Калим сўзлар: Россби тўлқинлари, найсимон оқим, иссиқлик тўлқинлари, омега-блокинг, гарбий оқим, дисперсия тенгламаси.

GENERATION OF HEAT WAVES BY PLANETARY WAVES OF ROSSBY

M.L. ARUSHANOV

Hydrometeorological Research Institute, mikl-arushanov@rambler.ru

Abstract. *The observed positive temperature trend and the associated increase in the frequency and intensity of heat waves are due to the atmosphere's own oscillations of the second kind (Rossby waves), or more precisely, the interaction of Rossby waves with jet streams. At the latitudes of Central Asia, circumglobal Rossby waves are associated with a highly sinuous jet stream and can cause simultaneous heat waves and floods not only in this region, but throughout the entire Northern Hemisphere.*

This article provides a review of works devoted to the study of heat waves generated by Rossby waves due to the inhibition of the westerly transport with the formation of omega blocking (blocking process), causing significant warming in some areas of the region and flooding in neighboring areas.

The characteristic lengths of Rossby waves in January and July for the northern and southern hemispheres of the planet are obtained. It is shown that the planetary wave equation obtained by Rossby is applicable only to harmonic waves propagating without changing their shape in linear media. Since the processes of interaction of Rossby waves with jet streams are essentially nonlinear, the phase velocity of the wave is a function of frequency, i.e. the determining factor is the velocity dispersion, which means that it is necessary to consider the group velocity and the wave front velocity. The equation of dispersion of gravity-gyroscopic waves is presented, which in the high-frequency region of the spectrum expresses the dispersion law of gravity-gyroscopic waves, and in the low-frequency region - the dispersion law of Rossby waves.

Keywords: *Rossby waves, jet stream, heat waves, omega blocking, westerly transport, dispersion equation.*

REFERENCES

Arushanov M.L. *Practicheskie voprosy ispolzovaniya veivlet preobrazovaniya v meteorologii [Practical issues of using wavelet transform in meteorology]* – Tashkent: NIGMI, 2015. – 41 s. (in Russian)

Belonenko T.V., Novoselova E.V. Metody ocenki baroklinnogo radiusa deformacii Rossbi [Methods for Estimating the Baroclinic Rossby Deformation Radius]. – S-Pb.: Gosudarstvennyi Universitet. – 2019. – 25 s. (in Russian)

Goldstein R.V., Gorodtsov V.A. Mehanika sploshnyh sred. Chast 1 [Continuum mechanics. Part 1]. – M.: Nauka, 2000. – 256 s. (in Russian)

Lyapidevskiy V.Yu., Teshukov V.M. Matematicheskie modeli rasprostraneniya dlennyh voln v neodnorodnoi jidcosti [Mathematical models of propagation of long waves in an inhomogeneous liquid]. – Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie Akademii Nauk. – 2000. – 419 s. (in Russian)

УДК: 551.524:575.1

SKY IMAGER ЁРДАМИДА БУЛУТ ҚОПЛАМАСИ ДАРАЖАСИНИ АНИҚЛАШ

Э.Ю. РАХИМОВ^{1*}, А.А. ИМЯМИНОВ¹, Б.Ю. ОМОНОВ¹

¹ Ўзбекистон Республикаси Энергетика вазирлиги хузуридаги Қайта тикланувчи энергия манбалари миллий илмий-тадқиқот институти, ejurakhimov@gmail.com, abдуманнов7445@gmail.com, bahromomonov0627@gmail.com

Аннотация. Мақолада қуёш фотоэлектрик тизимларининг (ФЭТ) самарадорлигини ошириш учун осмонни булут қоплаш даражасини аниқлашда sky imager қурилмасидан фойдаланиш имконияти ўрганилган. Муаллифлар томонидан HikVision камерасидан фойдаланиб, рақамли тасвирни қайта ишлаш орқали осмоннинг булут билан қопланиш даражасини автоматик аниқлаш тизими ишлаб чиқилган. Тадқиқот булут динамикасини кузатиш ва қуёш радиациясини прогнозлаш орқали ФЭТ самарадорлигини яхшилашга қаратилган. Тизим Python дастурлаш тили ёрдамида амалга оширилиб, булут ҳаракатини қуёш ҳолати маълумотлари билан биргалликда таҳлил қилади. Олинган натижалар ушбу тизим қуёш энергиясини прогнозлашни яхшилашни кўрсатди. Таклиф этилган усулни келажакда Ўзгидромет тизимларига интеграциялаш қайта тикланувчи энергия манбаларидан самарали фойдаланишга имкон беради.

Калит сўзлар: фотоэлектрик станция (ФЭС), кўриш майдони (FOV), умумий осмон тасвирлари (TSI), sky imager, булут қопламаси.

Кириш. Қуёш фотоэлектрик тизимлари каби қайта тикланувчи энергия манбалари келажак энергия тизимлари учун асосий компонент ҳисобланади [Intergovernmental ...]. Қайта тикланувчи энергия манбалари соҳасида, хусусан, қуёш энергиясидан фойдаланишга асосланган технологияларнинг ривожланиши ва сайёрамизда қуёш фотоэлектрик станциялари сонининг ортиши энергия ишлаб чиқариш соҳасидаги янги тенденциялардир.

Кенг миқёсдаги фотоэлектрик тизим (ФЭТ)лар интеграциясидаги муаммолардан бири энергия ишлаб чиқаришнинг беқарорлиги ҳисобланади. Фотоэлектрик станцияларнинг электр энергияси ишлаб чиқаришига таъсир кўрсатувчи турли омиллар орасида булутлилик асосий ҳисобланиб, перпендикуляр юзага тўғри радиациянинг келишига таъсир қилади ва қуёш электр станцияларининг кундузги соатларда барқарор ишлашига тўсқинлик қилади. Бинобарин, бундай ҳодисаларни олдиндан билиш учун булутларнинг ҳолати ва ҳаракати маълум бўлиши керак [Si et al., 2021]. ФЭТ нинг энергия ишлаб чиқариш самарадорлиги булутларнинг ўтиши туфайли қисқа вақт оралиғида катта

* Масъул муаллиф: ejurakhimov@gmail.com, тел.: +998 97 741-68-95