DOI:10.21513/2410-8758-2024-1-93-108 УДК: 521.524.3

Классификация точек земной поверхности, основанная на свойствах годового хода переменных, характеризующих состояние приповерхностного слоя

С.М. Семенов[1,2], Н.Ю. Добролюбов[1)]*

[1)] Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б,

[2)] Институт географии РАН, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

*Адрес для переписки: *dobronik@yandex*.ru

Реферат. Предложен подход к оценке сезонности, основанный на свойствах годового хода характеристик – переменных состояния – приповерхностного слоя. Фактической основой этой оценки является массив месячных значений какой-либо переменной состояния приповерхностного слоя (температура, сумма осадков и т.п.) за климатически значимый период времени (например, 1, 2 или 3 десятилетия). Считается, что в пределах этого периода возможен линейный тренд исследуемой переменной, но характер ненаправленной изменчивости не меняется. В результате анализа этих данных для любого года в пределах рассматриваемого периода времени устанавливаются значения параметров годового хода, т.е. сезонных систематических отклонений от среднегодового значения, а также их стандартные отклонения. Далее, в календарном году каждому месяцу ставится в соответствие число R, равное 1, (-1) или 0 в зависимости от того, является ли соответствующее ему отклонение достоверно положительным, достоверно отрицательным или неопределенным в отношении знака. Эта R-последовательность используется для характеристики сезонности. Для примера классификации точек географического пространства с использованием сезонности в работе выбирался год, соответствующий центру рассматриваемого периода времени. Считается, что для двух точек географического пространства сезонность в отношении изучаемой переменной идентична, если их R-последовательности, состоящие из 12 чисел, совмещаются циклической перестановкой месяцев. Этот подход применен к глобальному анализу сезонной изменчивости температуры. При этом использованы данные реанализа NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis V3 за 1981-2010 гг. Полученная классификация сезонности представлена в виде карт-схем и снабжена соответствующими географическими комментариями.

Ключевые слова. Климат, метеорологические переменные, прикладные индексы, годовой ход, классификация сезонности.

Classification of the Earth's surface points based on the properties of the yearly course of variables characterizing a state of the near-surface layer

S.M. Semenov[1,2], *N.Yu. Dobrolyubov*[1]*

[1] Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

[2] Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 119017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *dobronik@yandex.ru*

Abstract. An approach to assessing seasonality is proposed based on the properties of the yearly course of variables characterizing a state of the near-surface layer. The factual basis of this assessment is an array of monthly values of a variable of the state of the near-surface layer (temperature, total precipitation, etc.) over a climatically significant time period (for example, 1, 2 or 3 decades). It is assumed that within this period a linear trend of the variable is possible, but the nature of non-directional variability does not change. As a result of the analysis of these data, for any year within the time period under consideration, the yearly course parameters, i.e. seasonal systematic deviations from the annual mean, as well as their standard deviations are estimated. Further, for calendar year, any month is assigned with a number *R* equal to 1, (-1) or 0, depending on whether the corresponding deviation is positive, negative or uncertain with respect to the sign. This *R*-sequence is used to characterize seasonality. For an example of classifying points of geographic space using seasonality, the year corresponding to the center of the time period under consideration was chosen in this paper. For two points in geographic space, seasonality in relation to the variable being studied is considered to be identical, if their *R*-sequences, consisting of 12 numbers, coincide under cyclic permutation of months. This approach is applied to the global analysis of seasonal temperature variability. In this case, data from the NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis V3 reanalysis for 1981-2010 were employed. The resulting classification of seasonality is presented in the form of schematic maps and provided with appropriate geographical comments.

Keywords. Climate, meteorological variables, applied indices, yearly course, seasonality classification.

Введение

Идея этой работы возникла при построении климатических ареалов видов, исходя из их климатических предикторов. Это – собственно климатические значения метеорологических величин (средние значения температуры, количества осадков и т.д.) или прикладные климатические индексы – температура июля (самого теплого месяца) или января (самого холодного месяца), сумма осадков или гидротермический коэффициент за вегетационный период

и т.п. Проблемы возникли тогда, когда оценки, полученные для нашей страны или региона, расположенных в Северном полушарии, было необходимо получить и для Южного полушария – см., например, (Добролюбов и др., 2023). Ведь самый теплый месяц в Северном полушарии, скажем, в умеренных широтах - июль - вообще говоря не является таковым в Южном полушарии. Первый импульс – воспользоваться полушарной симметрией и считать, что самый теплый месяц в Южном полушарии есть январь, приводит к неверному результату.

Для преодоления этих проблем в данной работе предложен подход к оценке сезонности, специфичной для какой-либо переменной состояния приповерхностного слоя и основанный на свойствах ее годового хода. Этот подход применен при систематическом глобальном рассмотрении годового хода среднемесячной температуры в различных точках географического пространства. Сезонность характеризовалась физически простейшим образом, через свойства годового хода – периодами года, когда среднемесячные значения больше либо меньше среднегодового значения изучаемой переменной. Такой, несколько формальный подход – в духе классического подхода В.П. Кёппена к классификации климатов. Основные направления классификации климатов систематически представлены в публикации (Кислов, 2023).

Метод

Исследуются свойства переменной X – одной из характеристик приповерхностного слоя (например, температуры воздуха или суммы осадков). Временное разрешение для этой характеристики – 1 месяц. Рассматривается совокупность значений этой переменной $\{X_{i,j}\}$, где i – порядковый номер года t_i ($1 \le i \le I$), а j – порядковый номер месяца ($1 \le j \le J = 12$).

Для анализа совокупности значений $\{X_{i,j}\}$ применяется следующая модель:

$$X_{i,j} = (a + \alpha t_i) + \xi_i + (b_j + \beta_j t_i) + \eta_{i,j}\,, \qquad (1)$$

где a, α, b_j, β_j ($1 \le j \le J = 12$) – параметры модели. Они характеризуют детерминированную составляющую изменения рассматриваемой переменной во времени:

$(a + \alpha t_i)$ – математическое ожидание среднегодового значения температуры в год t_i;

$(b_j + \beta_j t_i)$ – математическое ожидание систематического отклонения в год t_i среднемесячного значения j-го месяца ($1 \le j \le J = 12$) от математического ожидания среднегодового значения в год t_i; при этом

$$\sum_{j=1}^{J} b_j = 0 \text{ и } \sum_{j=1}^{J} \beta_j = 0\,.$$

Для характеристики ненаправленной изменчивости рассматриваемой переменной введены следующие случайные величины:

ξ – центрированная случайная величина с дисперсией D_0;

η_j - центрированная случайная величина с дисперсией D_j ($\eta_{i,j}$ – ее реализация в год t_i).

Знак астериска «*» далее означает, что по соответствующему индексу проведено осреднение (от 1 до J для индекса j и от 1 до I для индекса i). Надстрочный символ « ⌢ » означает оценку того параметра, которое под ним находится.

1. Равенство (2)

$$X_{i,*} = (a + \alpha t_i) + (\xi_i + \eta_{i,*}), \tag{2}$$

полученное осреднением равенства (1) по индексу j, показывает, что $\{X_{i,*}\}$ линейно зависит от t_i с точностью до реализаций $(\xi_i + \eta_{i,*})$,(центрированной случайной величины, дисперсия которой есть $D_0 + \left(\frac{1}{J^2}\right) \sum_{n=1}^{J} D_n$). Для оценок дисперсий $\widehat{D}_0$ и $\widehat{D}_j$, $1 \le j \le J$, используется соотношение (3):

$$\widehat{D}_0 + \left(\frac{1}{J^2}\right) \sum_{n=1}^{J} \widehat{D}_n = \frac{1}{I-2} \sum_{m=1}^{I} \left(X_{m,*} - (\hat{a} + \hat{\alpha}\, t_m)\right)^2. \tag{3}$$

Значения $\hat{a}$ и $\hat{\alpha}$ вычисляются по обычным формулам линейной регрессии:

$$\widehat{\alpha} = \frac{\sum_{m=1}^{I}(X_{m,*} - X_{*,*})(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2} \text{ и } \hat{a} = X_{*,*} - \hat{\alpha}\, t_*.$$

2. Для заданного номера месяца j в левой части соотношения (1) – повторим его здесь в несколько измененном виде:

$$X_{i,j} = (a + b_j) + (\alpha + \beta_j) t_i + (\xi_i + \eta_{i,j}), \tag{4}$$

при $i = 1,\ldots, I$ представлены значения, линейно зависящие от t_i с точностью до реализаций $(\xi_i + \eta_{i,j})$ случайной величины, дисперсия которой есть $D_0 + D_j$. Числа $g_j = (a + b_i)$ и $\gamma_j = (a + \beta_j)$ – параметры этой линейной зависимости.

Для оценок дисперсий $\widehat{D}_0$ и $\widehat{D}_j$ используется соотношение (5):

$$\widehat{D}_0 + \widehat{D}_j = \frac{1}{I-2} \sum_{m=1}^{I} \left(X_{m,j} - (\hat{g}_j + \hat{\gamma}_j t_m)\right)^2, \tag{5}$$

где $\hat{\gamma}_j = \frac{\sum_{m=1}^{I}(X_{m,j} - X_{*,j})(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}$ и $\hat{g}_j = (X_{*,j} - \hat{\gamma}_j t_*)$ – оценки γ_j и g_j, ($1 \le j \le J = 12$) соответственно.

3. Соотношения (3) и (5) вместе образуют систему уравнений

$$\widehat{D}_0 + \left(\frac{1}{J^2}\right) \sum_{n=1}^{J} \widehat{D}_n = U\,,$$

$$\widehat{D}_0 + \widehat{D}_j = V_j\,,\ \ j = 1, \dots, J,$$

где

$$U = \frac{1}{I-2} \sum_{m=1}^{I} \left(X_{m,*} - (\hat{a} + \hat{\alpha}\, t_m)\right)^2\,;$$

$$V_j = \frac{1}{I-2} \sum_{m=1}^{I} \left(X_{m,j} - (\hat{g}_j + \hat{\gamma}_j t_m)\right)^2, \qquad j = 1, \dots, J.$$

Ее решения:

$$\widehat{D}_0 = \frac{JU}{J-1} - \left(\frac{1}{J(J-1)}\right) \sum_{n=1}^{J} V_n\,,$$

$$\widehat{D}_j = V_j - \widehat{D}_0\,,\ \ j = 1, \dots, J.$$

При выполнении расчетов по этим формулам сперва используется первая формула. Если $\widehat{D}_0$ оказывается отрицательным, то принимается $\widehat{D}_0 = 0$. Если $\widehat{D}_0$ неотрицательно, а при использовании второй формулы $\widehat{D}_j$ получается отрицательным при каком-либо j, $1 \le j \le J$, то принимается $\widehat{D}_j = 0$ для этого j.

4. Рассмотрим, теперь, выражение $c_j(t) = b_j + \beta_j t$ и вычислим его оценку $\hat{c}_j(t) = \hat{b}_j + \hat{\beta}_j\, t$:

$$\hat{c}_j(t) = \hat{b}_j + \hat{\beta}_j t = \left(\hat{g}_j - \hat{a}\right) + \left(\hat{\gamma}_j - \hat{\alpha}\right)t = (X_{*,j} - \hat{\gamma}_j t_*) - (X_{*,*} - \hat{\alpha}\, t_*) + \left(\hat{\gamma}_j t - \hat{\alpha} t\right) =$$
$$= (X_{*,j} - X_{*,*}) + (t - t_*)(\hat{\gamma}_j - \hat{\alpha}).$$

Для удобства выкладок вычислим по-отдельности первый член последней суммы и второй множитель второго члена:

$$X_{*,j} - X_{*,*} = \left[(a + \alpha\, t_*) + \xi_* + \left(b_j + \beta_j t_*\right) + \eta_{*,j}\right] - \left[(a + \alpha\, t_*) + \xi_* + \eta_{*,*}\right] =$$

$$= \left(b_j + \beta_j t_*\right) + (\eta_{*,j} - \eta_{*,*})\,; \qquad (6)$$

$$\hat{\gamma}_j - \hat{\alpha} = \left[\frac{\sum_{m=1}^{I}\left(X_{m,j} - X_{*,j}\right)(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2} - \frac{\sum_{m=1}^{I}\left(X_{m,*} - X_{*,*}\right)(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}\right] =$$

$$= \frac{\sum_{m=1}^{I}\left(X_{m,j} - X_{*,j} - X_{m,*} + X_{*,*}\right)(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}.$$

Учитывая, что

$$X_{m,j} - X_{*,j} - X_{m,*} + X_{*,*} = \left[(a + \alpha t_m) + \xi_m + \left(b_j + \beta_j t_m\right) + \eta_{m,j}\right] -$$
$$-[(a + \alpha t_*) + \xi_* + \left(b_j + \beta_j t_*\right) + \eta_{*,j}] - [(a + \alpha t_m) + \xi_m + \eta_{m,*}] +$$
$$+[(a + \alpha t_*) + \xi_* + \eta_{*,*}] = \beta_j(t_m - t_*) + \left[\eta_{m,j} - \eta_{*,j} - \eta_{m,*} + \eta_{*,*}\right],$$

получаем:

$$\hat{\gamma}_j - \hat{\alpha} = \beta_j + \frac{\sum_{m=1}^{I}\left(\eta_{m,j} - \eta_{m,*}\right)(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}. \qquad (7)$$

Из равенств (6) и (7) следует, что

$$\hat{c}_j(t) = \hat{b}_j + \hat{\beta}_j t = \left(X_{*,j} - X_{*,*}\right) + (t - t_*)\left(\hat{\gamma}_j - \hat{\alpha}\right) =$$

$$= \left(b_j + \beta_j t_*\right) + \left(\eta_{*,j} - \eta_{*,*}\right) + (t - t_*)\left[\beta_j + \frac{\sum_{m=1}^{I}\left(\eta_{m,j} - \eta_{m,*}\right)(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}\right] =$$

$$= c_j(t) + \left(\eta_{*,j} - \eta_{*,*}\right) + (t - t_*)\left[\frac{\sum_{m=1}^{I}\left(\eta_{m,j} - \eta_{m,*}\right)(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}\right].$$

Обозначим символами μ_j и $\nu_j(t)$ соответственно второе и третье слагаемое последнего выражения, а символом $\theta_j(t)$ их сумму. В следующей выкладке E[] и D[] означают соответственно математическое ожидание и дисперсию величин, заключенных в квадратные скобки. Вычислим дисперсию

$$D\left[\theta_j(t)\right] = E\left[\left(\mu_j + \nu_j(t)\right)^2\right] = E\left[\mu_j{}^2\right] + 2E\left[\mu_j \nu_j(t)\right] + E\left[\left(\nu_j(t)\right)^2\right]$$

почленно:

$$E\left[\mu_j{}^2\right] = \frac{D_j}{I}\left(1 - \frac{2}{J}\right) + \frac{1}{IJ^2}\sum_{n=1}^{J} D_n \ ;$$

$$2E\left[\mu_j \nu_j(t)\right] = 2(t - t_*)\left[\frac{\sum_{m=1}^{I} E\left[\left(\eta_{*,j} - \eta_{*,*}\right)\left(\eta_{m,j} - \eta_{m,*}\right)\right](t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}\right] =$$

$$= 2(t - t_*)\left[\frac{\sum_{m=1}^{I}\left[\frac{D_j}{I}\left(1 - \frac{2}{J}\right) + \frac{1}{IJ^2}\sum_{n=1}^{J} D_n\right](t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}\right] =$$

$$= 2(t - t_*)\left[\frac{D_j}{I}\left(1 - \frac{2}{J}\right) + \frac{1}{IJ^2}\sum_{n=1}^{J} D_n\right]\left[\frac{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)}{\sum_{m=1}^{I}(t_m - t_*)^2}\right] = 0 \ ;$$

$$E\left[\left(\nu_j(t)\right)^2\right] = \frac{(t-t_*)^2}{[\sum_{m=1}^{I}(t_m-t_*)^2]^2}\sum_{\substack{m=1\\k=1}}^{I} E[(\eta_{m,j}-\eta_{m,*})(\eta_{k,j}-\eta_{k,*})](t_m-t_*)(t_k-t_*) =$$

$$= \frac{(t-t_*)^2}{[\sum_{m=1}^{I}(t_m-t_*)^2]^2}\sum_{\substack{m=1\\k=1}}^{I} \delta_{m,k}[\left(1-\frac{2}{J}\right)D_j + \frac{1}{J^2}\sum_{n=1}^{J} D_n](t_m-t_*)(t_k-t_*) =$$

$$= \left[\left(1-\frac{2}{J}\right)D_j + \frac{1}{J^2}\sum_{n=1}^{J} D_n\right]\frac{(t-t_*)^2}{\sum_{m=1}^{I}(t_m-t_*)^2}.$$

В предпоследнем выражении $\delta_{m.k.}$ – символ Кронекера.

Таким образом

$$D[\theta_j(t)] = \left[\left(1-\frac{2}{J}\right)D_j + \frac{1}{J^2}\sum_{n=1}^{J} D_n\right]\left[\frac{1}{I} + \frac{(t-t_*)^2}{\sum_{m=1}^{I}(t_m-t_*)^2}\right].$$

При $t = t_*$ (т.е. в «средний» момент времени) это выражение имеет наиболее простой вид:

$$D[\theta_j(t_*)] = \frac{1}{I}[\left(1-\frac{2}{J}\right)D_j + \frac{1}{J^2}\sum_{n=1}^{J} D_n\,].$$

5. Для характеристики сезонности формируется последовательность $\{R_j\}$ по следующему правилу:

если $\hat{c}_j(t_*) = \hat{b}_j + \hat{\beta}_j t_* < -1.645\sqrt{D[\theta_j(t_*)]}$, то $R_j = -1$;

если $\hat{c}_j(t_*) = \hat{b}_j + \hat{\beta}_j t_* > 1.645\sqrt{D[\theta_j(t_*)]}$, то $R_j = 1$;

в остальных случаях $R_j = 0$.

Здесь 1.645 есть 95-я односторонняя квантиль нормального распределения.

Считается, что две точки географического пространства принадлежат одному классу по характеристике сезонности, если их R-последовательности совпадают либо могут быть совмещены циклической перестановкой по номеру месяца.

Результаты и обсуждение

Изложенный в предыдущем разделе метод применен для классификации точек географического пространства, исходя из данных месячного разрешения о температуре в приповерхностном слое. Источник данных – реанализ NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis V3 (NOAA/CIRES/DOE 20th Century Reanalysis (V3) предоставляется в режиме свободного доступа NOAA PSL, Boulder, Colorado, USA, https://psl.noaa.gov). Данные характеризуют

1981-2010 гг.; пространственное разрешение - 1°x1°. Ключевая публикация, в которой характеризуются эти данные – (Slivinski et al., 2019).

Для реализации изложенного выше алгоритма была написана программа, осуществляющая расчет параметров годового хода, оценок дисперсий и анализ совпадений *R*-последовательностей с точностью до циклической перестановки номеров месяцев. Обход точек (узлов географической сетки) производится с запада на восток и с севера на юг. Присвоение точкам номеров классов происходит автоматически, в порядке обнаружения очередного класса. В результате проведенной классификации выделено 516 классов.

На рис. 1 представлен результат классификации. Отображены 16 самых многочисленных классов (с числом точек более 100 каждый). Цветовая маркировка и *R*-последовательности (по первой найденной точке конкретного класса) указаны в табл. 1. Координаты первой точки соответствующего класса указаны во 2-м столбце, число точек – в 3-м. Сортировка классов – по убыванию количества точек, входящих в класс.

Остальные - классы с малым числом точек - примыкают к экваториальной зоне. Они не отображены на рис. 1 – бесцветны. Можно предположить, что их разнообразие – результат прежде всего нечеткой выраженности годового хода инсоляции в этой части географического пространства и, вследствие этого, большего влияния региональных и локальных факторов нерадиационной природы.

Самый многочисленный класс представлен сезонным профилем с номером 3. Он имеет 6 теплых и 6 холодных месяцев. Характерен для Европы, Ближнего Востока, Северо-Западной Африки, большей части территории США и обширных частей Атлантического, Тихого, Индийского и Северного Ледовитого океанов.

Таблица 1. R-последовательности (сезонные профили) классов с числом точек более 100 каждый

Table 1. R-sequences (seasonal profiles) of classes with more than 100 points each

№ класса	1-я точка	число точек	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	82°с.ш. 30°в.д.	18642	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
1	90°с.ш.	10359	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
2	87°с.ш. 75°в.д.	9394	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0	-1	-1
30	21°с.ш. 74°в.д.	5091	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
7	72°с.ш. 59°з.д.	4500	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1
5	75°с.ш. 2°в.д.	3275	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	1	-1	-1
8	66°с.ш. 121°з.д.	2750	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	1	1	-1	-1
4	77°с.ш. 18°в.д.	2415	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0	-1
6	75°с.ш. 31°в.д.	1747	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	1	0	-1
25	22°с.ш. 77°в.д.	1610	-1	-1	1	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1
13	24°с.ш. 62°в.д.	600	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	-1
10	48°с.ш. 145°з.д.	433	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	0	-1
12	25°с.ш. 75°в.д.	351	-1	-1	0	1	1	1	1	1	1	0	-1	-1
14	24°с.ш. 64°в.д.	333	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
9	48°с.ш. 152°з.д.	278	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	-1	-1
11	25°с.ш. 73°в.д.	246	-1	-1	0	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1

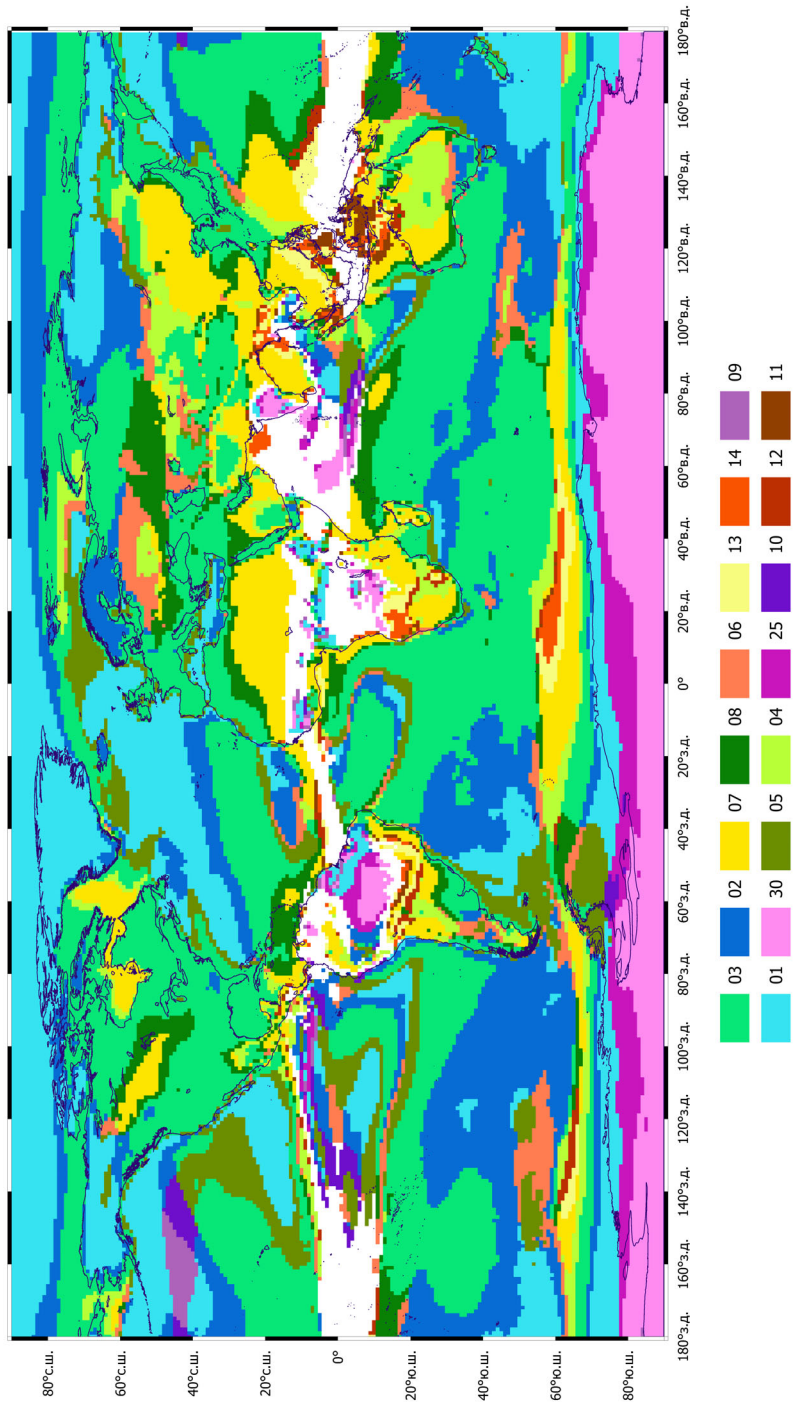

Рисунок 1. Шестнадцать классов с числом точек более 100 каждый

Figure 1. Sixteen classes with more than 100 points each

Профиль с номером 7 имеет 7 месяцев с температурой выше среднегодовой. Типичен для северной Африки, западной Австралии, тропических районов Индийского и Тихого океанов, Дальнего Востока. Отмечается также в Северной Америке и вдоль Антарктического циркумполярного течения.

Профили с номерами 1 и 30 характерны для северной и южной полярных областей соответственно, хотя встречаются и в экваториальной зоне. У них соответственно 5 и 4 месяца с температурой выше среднегодовой.

Профили 2, 5 и 6 имеют по 5 теплых месяцев, но у них менее четкий переход между теплым и холодным периодами. Эти области чаще всего граничат с областями с сезонными профилями 1 и 3, образуя зону перехода от частей пространства с 5-ю теплыми месяцами к частям с 6-ю.

Для областей с сезонными профилями 25, 10, 9 ситуация аналогична. У них по 4 теплых месяца и менее четкий переход между теплым и холодным периодами. Эти области граничат с областями с профилями 30 и 1, образуя зону перехода от частей пространства с 4-мя теплыми месяцами к частям с 5-ю.

Области с сезонными профилями 4, 8, 12 также являются переходными от частей пространства с 6-ю теплыми месяцами к частям с 7-ю.

В целом, обнаружены 6 сезонных профилей с определенным, резким переходом между теплым и холодным периодами (в том числе области с 3-мя и 8-ю «теплыми» месяцами в году), а остальные сезонные профили характеризуются менее четким переходом, когда между этими периодами есть месяц(ы), для которых $R = 0$.

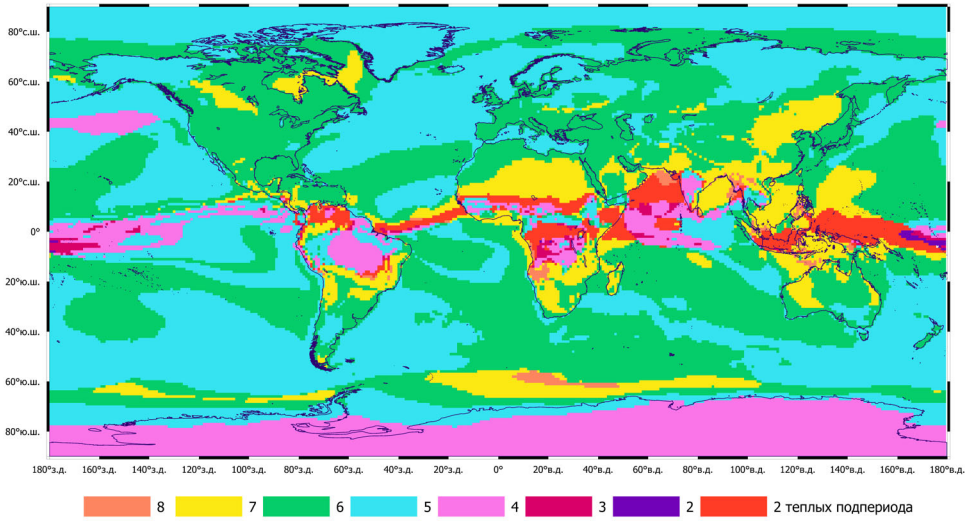

Рисунок 2. Длительность теплого периода (мес.)

Figure 2. Duration of the warm period (months)

Из 516-и обнаруженных 323 класса отличаются наличием двух отдельных достоверно «теплых» подпериодов. Эти классы малочисленны; их сезонные профили отличаются друг от друга продолжительностями «теплых» подпериодов, числом месяцев между ними и наличием месяцев с температу-

рами близкими к среднегодовым (R = 0). Всего в этих 323-х классах содержится 1611 точек. Все они примыкают к экваториальной зоне.

На рис. 2 представлена карта областей с одинаковым количеством «теплых» месяцев в году. Здесь же красным цветом показаны области с двумя «теплыми» периодами.

На рис. 3а-3в и рис. 4а-4в для самого обширного класса с сезонным профилем 3 показано, как циклически сдвигается теплый период в различных частях географического пространства. Напомним, что сезонный профиль для класса 3 имеет следующий вид: 6 подряд идущих теплых месяца, а затем – 6 подряд идущих холодных месяца. На всех шести рисунках бирюзовым фоном указан весь класс 3. Те же части пространства, для которых теплый период соответствует указанному в конкретном рисунке из шести, представлены зеленым цветом.

Рис. 3 характеризует Северное полушарие. На рис. 3а видно, что теплый период года апрель-сентябрь представлен весьма локально, в ограниченных частях географического пространства. Такие разрозненные домены встречаются в центральной и юго-восточной Мексике, Узбекистане, Туркменистане, на стыке территорий Ирана, Пакистана и Афганистана, в южной части Аравийского полуострова, в Якутии, в северо-западной части Китая и в Индии (в предгорьях Гималаев). Теплый период май-октябрь типичен, в основном, для материков, но охватывает и некоторую часть океанских акваторий: северные моря России на восток от Новой Земли, северную часть Охотского моря, Японское море, Восточно-Китайское море, полосу от восточного побережья Гренландии до Земли Франца-Иосифа, а также Лабрадорское море и море Баффина. Июнь-ноябрь является теплым периодом в основном для обширных частей в тропической зоне Тихого и Атлантического океанов.

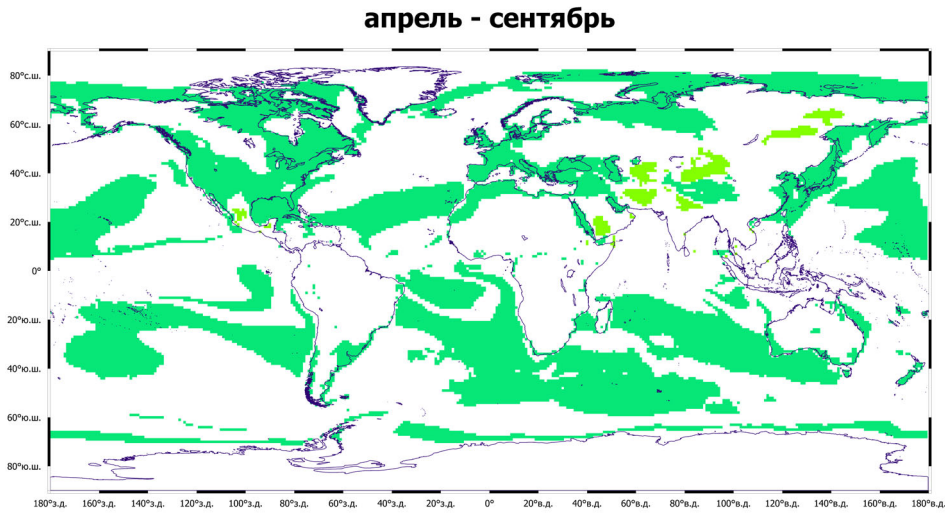

Рисунок 3а. Бирюзовый фон: весь класс 3, зеленый цвет: теплый период апрель-сентябрь

Figure 3a. Turquoise background: the whole class 3, green color: warm period is April-September

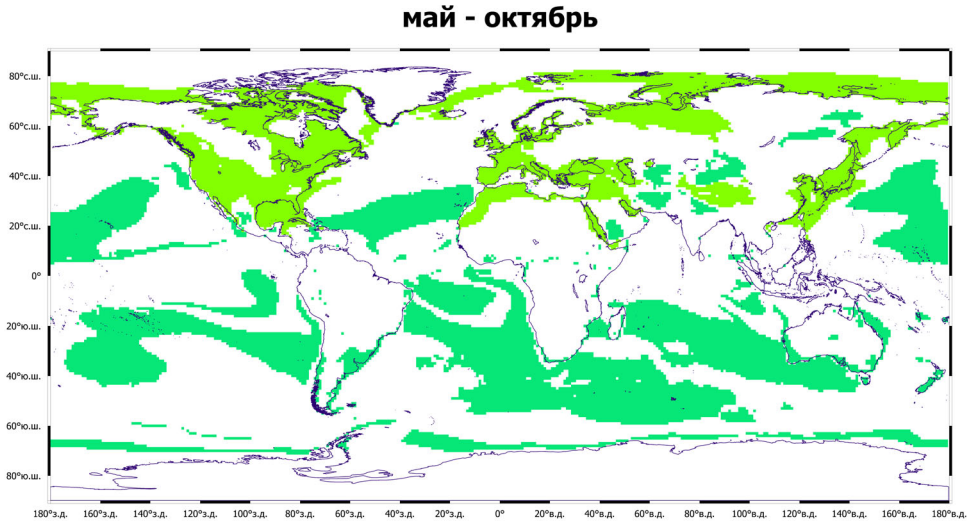

Рисунок 3б. Бирюзовый фон: весь класс 3, зеленый цвет:
теплый период май-октябрь

Figure 3б. Turquoise background: the whole class 3, green color:
warm period is May-October

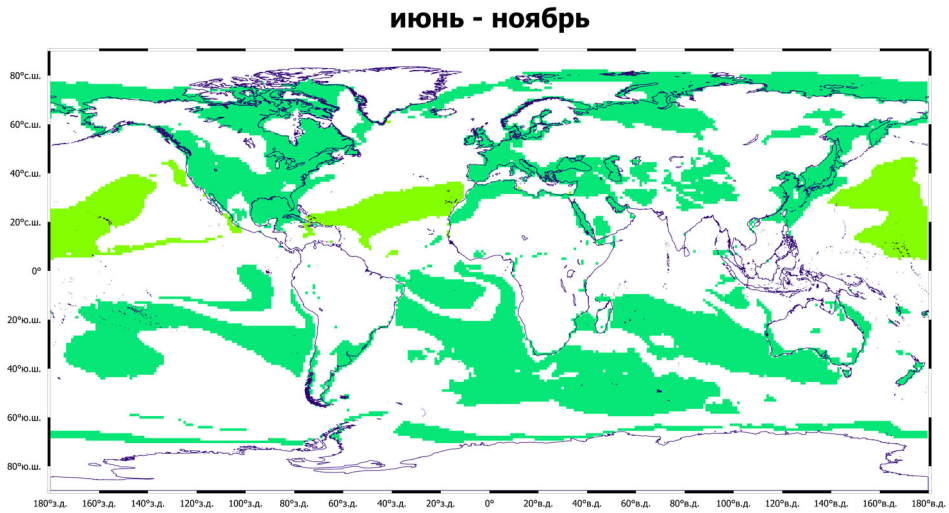

Рисунок 3в. Бирюзовый фон: весь класс 3, зеленый цвет:
теплый период июнь-ноябрь

Figure 3в. Turquoise background: the whole class 3, green color:
warm period is June-Novembe

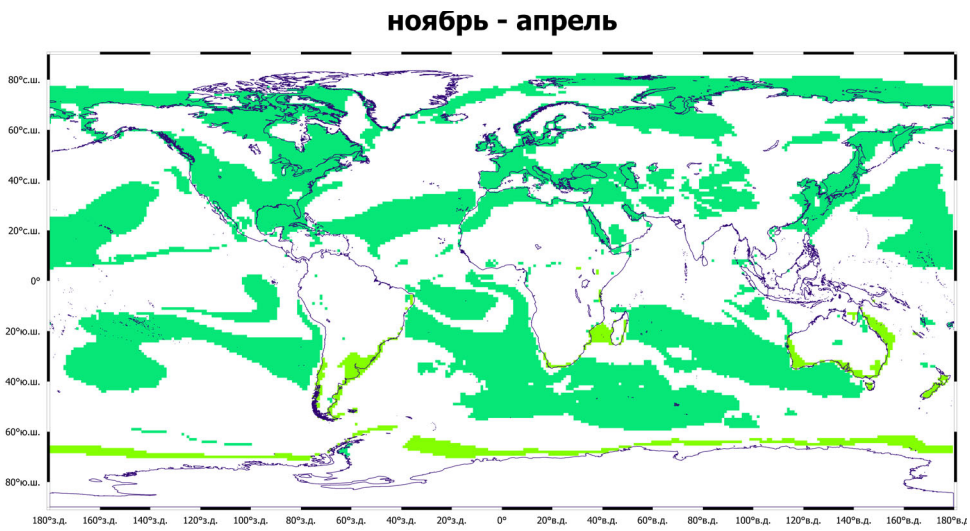

Рисунок 4а. Бирюзовый фон: весь класс 3, зеленый цвет:
теплый период ноябрь-апрель

Figure 4a. Turquoise background: the whole class 3, green color:
warm period is November-April

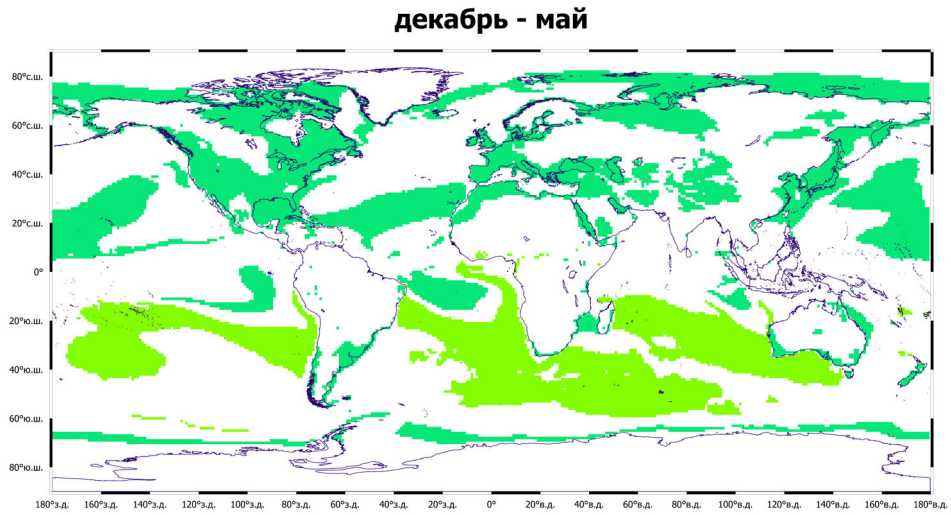

Рисунок 4б. Бирюзовый фон: весь класс 3, зеленый цвет:
теплый период декабрь-май

Figure 4б. Turquoise background: the whole class 3, green color:
warm period is December-May

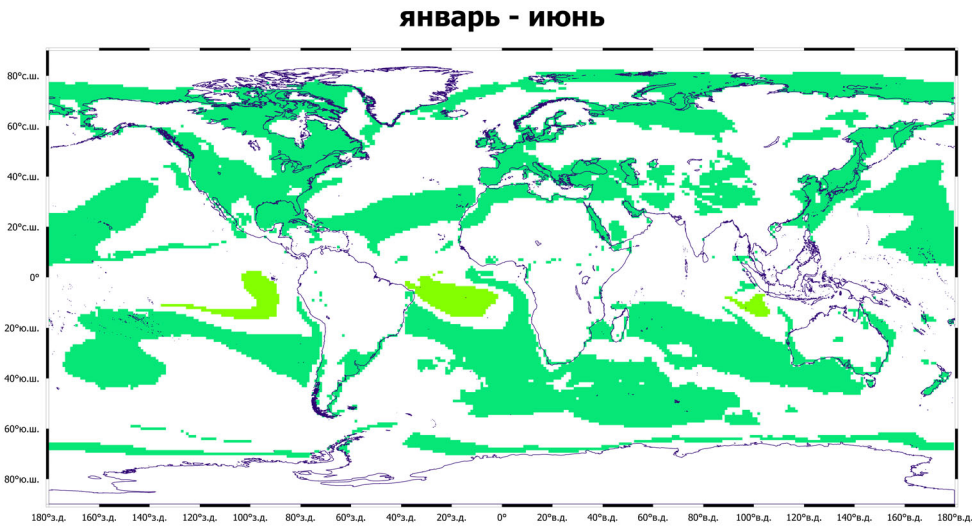

Рисунок 4в. Бирюзовый фон: весь класс 3, зеленый цвет: теплый период январь-июнь

Figure 4в. Turquoise background: the whole class 3, green color: warm period is January-June

Рис. 4а-4в характеризуют Южное полушарие. Теплый период ноябрь-апрель представлен в основном довольно узкой циркумполярной полосой в пределах 60-70º ю.ш. Он наблюдается также локально на северо-востоке Аргентины, в Мозамбикском проливе, на юго-западе и северо-востоке Австралии и в Новой Зеландии. Декабрь-май является теплым периодом в основном на обширных частях Тихого, Атлантического, Индийского и Южного океанов. Теплый период года январь-июнь представлен в экваториальной зоне тремя регионами в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах.

Отмечаются также незначительные по площади области 3-го класса, в которых теплый период наступает в июле, августе, сентябре и феврале.

На рис. 3 и 4 видно, что и в Северном полушарии, и в Южном полушарии, для класса 3 «теплый» период наступает в основном тем раньше, чем выше широта. Это несколько контринтуитивное утверждение надо воспринимать не забывая, что речь идет лишь о физическом локальном «теплом» периоде (т.е. когда параметр местного, локального годового хода достоверно положителен).

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке со стороны следующих программ и проектов:

Тема государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0001, 1021051403088-5 «Изменения климата, их причины и последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России»;

Тема 3.1. «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций» государственного задания ФГБУ «ИГКЭ» № АААА-А20-120070990079-6.

Список литературы

Добролюбов, Н.Ю., Семенов, С.М., Володин, Е.М., Богданович, А.Ю., (2023) Алгебраический алгоритм статистической оценки параметра биномиального распределения и пример его применения в одной глобальной геоинформационной задаче прикладной климатологии, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 16-24.

Кислов А.В., (2023) *Климатология с основами метеорологии*, Москва, Издательство Московского университета, ISBN 978-5-19-011812-4, 255 с.

Slivinski, L.C., Compo, G.P, Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Giese, B.S., McColl ,C., Allan, R., Yin, X., Vose, R., Titchner, H., Kennedy, J., Spencer, L.J., Ashcroft, L., Brönnimann, S., Brunet, M., Camuffo, D., Cornes, R., Cram, T.A., Crouthamel, R., Domínguez-Castro, F., Freeman, J.E., Gergis, J., Hawkins, E., Jones, P.D., Jourdain, S., Kaplan, A., Kubota, H., Le Blancq, F., Lee,T.-C., Lorrey, A., Luterbacher, J., Maugeri, M., Mock, C.J., Moore, G.W.K., Przybylak, R., Pudmenzky, C., Reason, C., Slonosky, V.C., Smith, C.A., Tinz, B., Trewin, B., Valente, M.A., Wang, X.L., Wilkinson, C., Wood, K., Wyszyński, P. (2019) Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 145, issue 724, pp. 2876-2908.

References

Dobrolyubov, N.YU., Semenov, S.M., Volodin, Ye.M., Bogdanovich, A.YU., (2023) Algebraicheskiy algoritm statisticheskoy otsenki parametra binomial'nogo raspredeleniya i primer yego primeneniya v odnoy global'noy geoinformatsionnoy zadache prikladnoy klimatologii [Algebraic Algorithm for Statistical Estimation of the Binomial Distribution Parameter and an Example of Its Application in a Global Geoinformation Task of Applied Clmatology], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 16-24.

Kislov A.V., (2023) *Klimatologiya s osnovami meteorologii* [Climatology with basic meteorology], Moskva, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, ISBN 978-5-19-011812-4, 255 p.

Slivinski, L.C., Compo, G.P, Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Giese, B.S., McColl ,C., Allan, R., Yin, X., Vose, R., Titchner, H., Kennedy, J., Spencer, L.J., Ashcroft, L., Brönnimann, S., Brunet, M., Camuffo, D., Cornes, R., Cram, T.A., Crouthamel, R., Domínguez-Castro, F., Freeman, J.E., Gergis, J., Hawkins, E.,

Jones, P.D., Jourdain, S., Kaplan, A., Kubota, H., Le Blancq, F., Lee,T.-C., Lorrey, A., Luterbacher, J., Maugeri, M., Mock, C.J., Moore, G.W.K., Przybylak, R., Pudmenzky, C., Reason, C., Slonosky, V.C., Smith, C.A., Tinz, B., Trewin, B., Valente, M.A., Wang, X.L., Wilkinson, C., Wood, K., Wyszyński, P., (2019) Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 145, issue 724, pp. 2876-2908.

Статья поступила в редакцию (Received): 15.10.2023.
Статья доработана после рецензирования (Revised): 05.11.2023.
Принята к публикации (Accepted): 06.11.2023.

Для цитирования / For citation

Семенов, С.М., Добролюбов, Н.Ю. (2024) Классификация точек земной поверхности, основанная на свойствах годового хода переменных, характеризующих состояние приповерхностного слоя, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 1, с. 93-108, doi:10.21513/2410-8758-2024-1-93-108.

Semenov, S.M., Dobrolyubov, N.Yu. (2024) Classification of the Earth's surface points based on the properties of the yearly course of variables characterizing a state of the near-surface layer, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 1, pp. 93-108, doi:10.21513/2410-8758-2024-1-93-108.