

УДК 911.52

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО МЕЗОКЛИМАТА

© 2019 г. А. Н. Кренке^{1,*}, Ю. Г. Пузаченко², М.Ю. Пузаченко¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, Москва, Россия

*e-mail: Krenke-igras@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.10.2017 г.; после доработки 26.12.2018 г.; принята в печать 24.01.2019 г.

В статье рассмотрен метод выделения иерархических уровней организации климатических переменных в масштабах области. На основе анализа базы данных *Worldclim* выделяются основные интегральные факторы, отражающие варьирование климатических переменных, и проводится их декомпозиция на иерархические уровни с различными линейными размерами колебаний. Иерархические уровни выделяются через изучение фрактальных размерностей различных участков спектра полученных факторов и выделения субгармоник на основе исследования остатков фрактальной модели. Проведенный анализ показывает факт наличия сложной иерархической организации мезоклимата региона. Подход позволяет выделить наиболее значимые масштабы и амплитуды колебаний климатических переменных, как для естественных, так и для сельскохозяйственных экосистем. Дифференциация варьирования климатических переменных в различных пространственных масштабах и влияние этих элементов на конкретный экосистемный объект создает единую основу для построения статистических моделей экосистемных процессов или моделей урожайности различных сельскохозяйственных культур. Показаны возможности визуализации варьирования климата на разных иерархических уровнях и отражения равновесных (нормативных) отношений между исследуемыми экосистемными процессами и текущим состоянием климата в регионе.

Ключевые слова: климат, иерархия, ландшафт, статистическое моделирование, экосистемные процессы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-556620193116-130>

ВВЕДЕНИЕ

Под климатом понимается среднее значение характеризующих его переменных (среднемесячной и среднегодовой температуры, суммы осадков за месяц и год, соответственно влажности воздуха, скорости ветра и облачности) за период в тридцать–пятьдесят лет. К этому, очевидно, полезно добавить величину тренда или дисперсию этих переменных за тот же период [2]. В настоящее время как наука, так и практика в основном воспринимает как климат, так и погоду в мелком масштабе, отвечающем масштабу карты более 1:10 000 000. Вместе с тем, очевидно, что это макроклиматическое восприятие существенно модифицируется на уровне мезоклимата соответствующего масштабу 1:100 000 до 1:10 000 000. Фактически именно мезоклимат имеет наибольшее практическое значение для всех сфер человеческой деятельности. Территориально этот уровень соответствует ландшафту в понимании российской ландшафтной школы [1, 7]. По-видимому, мезоклимат в основном определяет

варьирование биологической продуктивности. Именно этот уровень пространственного варьирования климатических переменных отображается в проекте *Worldclim* [10], а так же в тепловом канале спутника MODIS. Этот уровень широко используется в моделировании распространения отдельных видов растений и животных.

В настоящей статье обосновывается использование нового подхода к исследованию пространственной структуры и иерархической организации мезоклимата конкретного региона, и к созданию основы для решения задач интерполяции статистическими методами точечных измерений структуры растительности, свойств почв, биологической продуктивности, средне-многолетней урожайности сельскохозяйственных культур.

В целом этот подход может рассматриваться как форма представления поддерживающей экосистемной услуги на основе базы данных WORDCLIM 1.4 с разрешением 1 км на местности.

Поддерживающая экосистемная услуга складывается на иерархические уровни, каждый из которых может иметь специфическое влияние на функционирование ландшафтного покрова и прежде всего на биологическую продуктивность и почвообразующие процессы. Предлагаемый анализ мезоклимата проводится на примере территории Самарской области как важного производителя сельскохозяйственной продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. СОСТАВ БАЗЫ ДАННЫХ WORDCLIM И ПОСТРОЕНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Для аппроксимации климатических переменных Хатчинсон и др. [12] используют модель, аппроксимирующую измерения по множеству метеорологических станций, опирающуюся на комбинацию сплайнов, построенных методом упругих поверхностей ($f(x_i)$) с элементами линейной регрессии ($b^T y_i$).

Общее уравнение модели выглядит следующим образом:

$$z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i,$$

где z – значения искомой переменной в известных точках (i), $f(x_i)$ – сглаживание (сплайн) искомой переменной в d -мерном пространстве предикторов (внешних относительно z переменные (x_i), $b^T y_i$ – независимые предикаты, в сглаживания, в линейной модели регрессии и e_i – взвешенная ошибка. Включение внешней переменной функцию сглаживания или регрессии определяется на основе качества соответствующей модели.

Упругие сплайны являются модификацией кубических сплайнов в многомерном пространстве, где для каждого узла (избранные точки пространства) в пространстве предикторов ищется гладкое, всюду дважды дифференцируемое приближение.

Сплайны называют упругими, так как при их построении вводится так называемая энергетическая функция, накладывающая “штраф” на изогнутость сплайна. Задача минимизации изогнутости может рассматриваться как задача минимизации интеграла квадрата производных второго порядка:

$$I[f(x, y)] = \iint_{R^2} (f_{xx}^2 + 2f_{xy}^2 + f_{yy}^2) dx dy.$$

Таким образом удается достичь гладких поверхностей с наименьшей возможной кривизной. Учитывая значительный объем данных, узлы сплайнов выбирались как набор равноудаленных точек, описывающих изменчивость

независимых предикатов. Количество узлов выбиралось исходя из добавления узлов до тех пор, пока новые узлы перестают значительно изменять остатки и при условии отсутствия зоны систематических ошибок.

В качестве независимых предикатов используются: рельеф, полученный с помощью космической радарной съемки, температура поверхности и облачность по материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), расстояние до океана, долгота и широта.

Авторы базы данных WORDCLIM использовали различные комбинации сглаженных предикторов и ковариантов в своих моделях, однако общая тенденция: долгота, широта и высота – сглаженные переменные – остальные коварианты. Периодически, в зависимости от региона, к сглаженным переменным добавляется удаленность от побережья.

Так как существует значительная погрешность в исходных данных, вызванная ошибками записи, неправильно указанными единицами и т.п., авторы применяют итеративную процедуру поиска оптимального моделирования. Процедура методом исключения данных по принципу шахматной доски приводит к поиску наиболее стабильных станций, обеспечивающих наименьшую систематическую ошибку при экстраполяции на исключенные данные. Таким образом, ведется поиск ошибочных данных, и модель пересчитывается снова с учетом изменений в исходном наборе.

В базе данных WordClim воспроизведены для каждого месяца следующие средние значения климатических переменных за последние 20–30 лет (с разрешением 1 км на местности): средняя, максимальная и минимальная температура, сумма осадков, парциальное давление влаги, приход солнечной радиации и скорость ветра, а также двенадцать биоклиматических переменных, производных от температуры и осадков.

В настоящей статье рассматривается пространственное варьирование температур, осадков и упругости водяного пара. Территория Самарской области входит в единую модель, построенную для северо-восточной Евразии. В табл. 1 приведены выбранные оптимальные модели с оценкой их качества, ошибка и количество точек.

База данных WORLDCLIM содержит 103 переменные. Анализ пространственного варьирования каждой переменной хотя и возможен, но очень громоздок. Необходимо снизить размерность исходных данных и выделить независимые параметры порядка или пространственные инварианты, число которых обычно существенно меньше числа исходных переменных [2]. Эти пространственные инварианты фактически отображают элементарные независимые климатические

Таблица 1. Переменные в модели

Переменная		Модель	Кол-во точек	Ср. кв. ошибка	Корреляция с исходными данными	Средняя абсолютная ошибка
Температура (°C)	Мин.	$f(x, y, z, coast, sat)$	2343	1.408	0.993	0.927
	Макс.	$f(x, y, sat) + z$	2309	1.096	0.996	0.707
	Средняя	$f(x, y, sat) + z$	2391	1.025	0.996	0.631
Сумма осадков (мм)		$f(x, y, z) + coast$	3632	23.241	0.894	10.968
Парциальное давление влаги (kPa)		$f(x, y, z) + sat + coast$	2508	0.067	0.991	0.04

Примечание. x – широта, y – долгота, z – высота, $coast$ – удаленность от береговой линии, sat – температура по данным ДЗЗ.

процессы, и, в своей совокупности, полностью описывают варьирование всех переменных. Эта операция осуществляется методом главных компонент с ротацией осей, обеспечивающей максимально возможную равномерность распределения нагрузок на каждую компоненту [3]. Значение каждой переменной в пространстве есть линейная функция от рассчитанных и инвариантов. Полученные параметры порядка отражают варьирование мезоклимата на уровне разрешения в 1 км. Однако мезоклимат сам по себе может быть иерархически организован, и мощность его варьирования, в разных масштабах превышающих 1:1 000 000, может быть различна. Выделение иерархических уровней организации мезоклимата возможно на основе двухмерного спектрального анализа каждой инварианты, как это делается для рельефа в рамках анализа данных ДЗЗ [6]. Существование иерархических уровней количественно доказывается на основе рассмотрения остатков уравнения регрессии $\ln(S_p) = a - b \cdot \ln(1/P)$, где S_p – мощность спектра, P – пространственный период колебаний.

Для каждого иерархического уровня каждого параметра порядка с помощью обратного преобразования Фурье строится их пространственные отображения. Для каждого уровня оценивается вклад в описание варьирования каждого параметра. Затем на основе классификации по иерархическим уровням всех параметров порядка строится районирование мезоклимата и для каждого района на соответствующем уровне классификации рассчитываются средние значения всех исходных климатических переменных.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ОРГАНИЗАЦИИ МЕЗОКЛИМАТА САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ И ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ

Метод главных компонент на основе ковариационной матрицы рассчитывает n ортогональных осей (n – число заданных переменных) и соответствующие им собственные значения. На рис. 1 показаны собственные значения, выраженные через проценты, описываемые ими

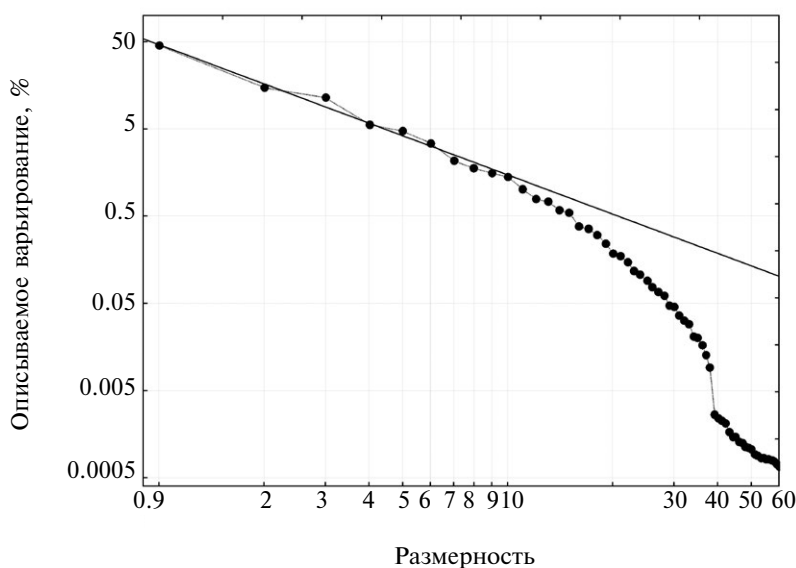


Рис. 1. Оценка размерности пространства климата методом “падающей осыпи”.

варьирования всех переменных. Размерность, которую можно принять достаточной для отображения переменных, определяется по отклонению реальных собственных значений от степенной модели (рис. 2). В данном случае, после 10-ой размерности, величины собственных значений компонент резко снижаются и их вклад в описание исследуемого явления ничтожен. Десять главных компонент описывает 93.66% варьирования. Однако первый перегиб на графике соответствует шестой главной компоненте, что позволяет рассматривать шестимерное пространство климата, описывающее 86.69% варьирования.

Таким образом, без существенных потерь можно отобразить варьирование 60 исходных переменных через десять или шесть независимых переменных. Следует отметить, что региональная размерность мезоклимата Самарской области очень велика (обычно даже на глобальном уровне достаточно четыре компоненты), что указывает на ее граничное положение в макроклиматической системе. Для упрощения примем размерность пространства равной шести компонентам. Для того чтобы отобразить “элементарные” региональные климатические процессы, осуществим операцию вращения, которая приводит к максимально равномерному распределению собственных значений для каждой главной компоненты.

В табл. 2 приведены значения нагрузок каждой переменной на каждую компоненту. “Нагрузки” — есть стандартизованные значения коэффициентов уравнения регрессии каждой климатической переменной от шести главных компонент. Значения этих нагрузок позволяют определить физический смысл каждой компо-

ненты. Показано пространственное варьирование значений 6 главных компонент.

Первая компонента описывает варьирование переменных, отражающих температуру с апреля по сентябрь и за ноябрь, и чем светлее тон на рисунке, тем выше температура. Она также вносит наибольший вклад в варьирование осадков, но с обратным знаком: чем темнее тон, тем выше осадки, определяет парциальное давление влаги с февраля по май, а также в ноябре.

Вторая компонента описывает 16.4% варьирования и в первую очередь отражает температуру декабря и января, а также ноября.

Третья главная компонента отражает пространственное варьирование парциального давления влаги с мая по октябрь.

Четвертая главная компонента отражает пространственное варьирование осадков в зимние месяцы.

Пятая главная компонента отражает температуру февраля, а шестая — температуру марта. Таким образом, можно констатировать, что поле температуры наиболее сложно организовано и определяется четырьмя независимыми процессами. Летом северная часть территории в среднем более холодная, чем южная, так же летом хорошо выражено увеличение температуры по речным долинам. В январе—феврале наиболее холодная — центральная часть региона и хорошо выражена наиболее теплая долина р. Волги. В феврале наиболее холодными являются северо-восток и юго-запад, а центральная часть более теплая. В марте поле температур весьма мозаично: выделяются две области с относительно высокими температурами, а долины рек наиболее холодные. Парциальное давление влаги (третья главная компонента) в целом минимально

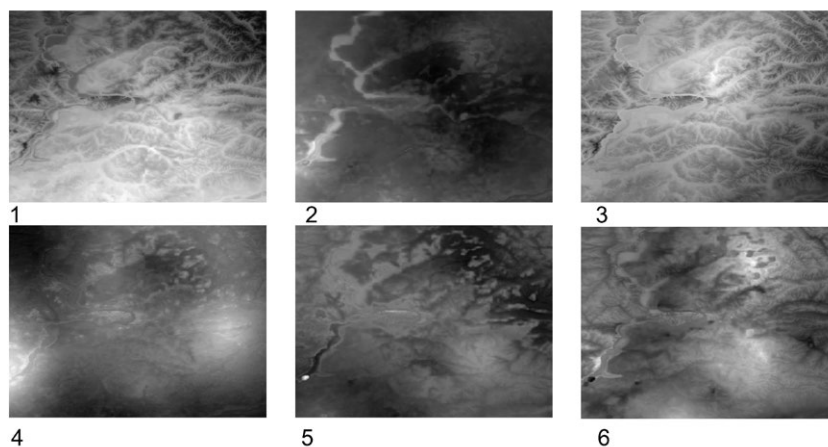


Рис. 2. Пространственное варьирование шести главных компонент (параметров порядка), описывающих 86.69% варьирования 60 переменных.

1 — 37.8% варьирования, температура и осадки летом; 2 — 16.4% температура декабря и января; 3 — 10.1% — парциальное давление влаги с мая по октябрь, 4 — 9.7% — зимние осадки; 5 — 6.1% — температура февраля; 6 — 6.6% — температура марта.

Таблица 2. Факторные нагрузки для шести главных компонент климатической системы

	Месяц	Компонента 1	Компонента 2	Компонента 3	Компонента 4	Компонента 5	Компонента 6
Средняя температура	1	0.215	0.811	0.176	-0.027	0.318	0.002
	2	0.062	0.053	0.028	-0.168	0.890	-0.165
	3	-0.368	0.203	0.119	-0.173	0.334	-0.755
	4	0.826	0.188	-0.220	-0.031	-0.162	-0.339
	5	0.909	0.223	-0.077	0.029	0.000	0.083
	6	0.938	0.254	-0.139	-0.027	-0.006	0.022
	7	0.926	0.274	-0.183	-0.075	-0.017	0.008
	8	0.794	0.493	-0.050	0.014	0.032	0.119
	9	0.869	0.021	-0.071	0.147	0.008	0.381
	10	0.314	0.790	0.007	-0.150	-0.188	-0.200
	11	0.739	0.470	0.090	0.143	0.161	0.244
	12	0.609	0.667	0.118	-0.044	0.261	0.148
Минимальная температура	1	-0.146	0.831	0.092	0.045	0.399	-0.009
	2	-0.363	0.203	-0.053	-0.044	0.839	-0.140
	3	-0.557	0.268	0.051	-0.090	0.371	-0.630
	4	0.472	0.443	-0.368	0.074	0.004	-0.433
	5	0.649	0.481	-0.190	0.140	0.190	0.088
	6	0.774	0.471	-0.244	0.048	0.140	0.015
	7	0.880	0.242	-0.140	0.135	0.006	0.217
	8	0.729	0.441	-0.011	0.210	0.051	0.310
	9	0.749	-0.001	-0.032	0.297	0.026	0.504
	10	0.305	0.791	0.049	0.077	-0.169	0.026
	11	0.643	0.397	0.112	0.303	0.162	0.393
	12	0.484	0.524	0.150	0.252	0.249	0.415
Максимальная температура	1	0.560	0.617	0.231	-0.100	0.163	0.014
	2	0.533	-0.142	0.113	-0.249	0.617	-0.132
	3	-0.064	0.088	0.191	-0.259	0.238	-0.814
	4	0.902	0.009	-0.099	-0.088	-0.234	-0.231
	5	0.948	0.048	-0.003	-0.039	-0.108	0.069
	6	0.967	0.100	-0.063	-0.071	-0.096	0.025
	7	0.840	0.265	-0.197	-0.257	-0.036	-0.185
	8	0.748	0.476	-0.080	-0.180	0.008	-0.085
	9	0.901	0.044	-0.108	-0.045	-0.013	0.192
	10	0.279	0.683	-0.028	-0.313	-0.177	-0.357
	11	0.751	0.489	0.054	-0.054	0.139	0.045
	12	0.535	0.592	0.046	-0.327	0.187	-0.168
Осадки	1	-0.037	0.138	0.170	0.883	-0.145	0.056
	2	-0.025	-0.332	0.313	0.830	-0.070	0.109
	3	-0.272	0.009	0.048	0.844	-0.087	0.142
	4	-0.512	-0.292	0.541	0.376	0.152	0.040
	5	-0.667	-0.350	0.464	0.203	-0.007	0.098
	6	-0.546	-0.509	0.538	0.201	0.115	0.192
	7	-0.833	-0.240	0.295	0.211	-0.054	0.027
	8	-0.867	-0.232	0.296	0.189	-0.078	0.005
	9	-0.495	-0.343	0.647	0.216	0.055	0.277
	10	-0.580	-0.583	0.271	0.381	0.034	0.103
	11	0.108	-0.145	0.177	0.902	-0.010	0.097
	12	0.405	-0.104	-0.143	0.835	-0.061	0.114

Таблица 2. Окончание.

	Месяц	Компонента 1	Компонента 2	Компонента 3	Компонента 4	Компонента 5	Компонента 6
Давление влаги	1	0.381	0.459	0.299	-0.525	0.204	-0.177
	2	0.564	0.445	0.377	-0.204	0.193	-0.030
	3	0.821	0.219	0.368	-0.006	0.246	0.038
	4	0.821	-0.017	-0.295	-0.013	-0.257	0.059
	5	0.457	0.419	0.588	-0.256	0.160	-0.221
	6	0.032	0.147	0.931	0.130	0.110	-0.120
	7	-0.509	0.182	0.759	0.095	-0.018	-0.169
	8	-0.240	0.058	0.934	0.080	0.068	-0.027
	9	-0.172	0.274	0.686	0.096	-0.341	-0.064
	10	0.031	0.673	-0.009	-0.294	-0.122	-0.501
	11	0.713	0.195	0.367	-0.020	0.450	-0.025
	12	0.339	0.614	0.149	-0.433	-0.108	-0.310
Описанное варьирование	37.8	16.4	10.1	9.7	6.1	6.6	

на востоке и западе, и максимально по долинам рек. Зимние осадки демонстрируют чередование областей с большим и малым их количеством. Обратим внимание на то, что климат, отображаемый через главные компоненты, практически для всех климатических переменных иерархически организован. То есть для каждой компоненты существует по крайней мере два масштаба пространственной изменчивости: региональный, практически не связанный с рельефом, и локальный, напротив, внешне определяемый рельефом. Эта очевидная мультимасштабная изменчивость климата определяет необходимость исследования его иерархической организации.

Иерархическая организация мезоклимата региона

В соответствии с теорией многокомпонентных нелинейных систем в пределе они генерируют самоподобные фрактальные множества или фликер шум с мощностью спектра $S_p \sim f^b$ (f – частота) Динамические системы, имеющие различную фрактальную размерность или степень b , устроены несколько отлично, но обратное не обязательно. Сложная система в разных областях частот может управляться различными динамическими системами и иметь, соответственно, разные фрактальные размерности. В нашем

случае вклад в иерархическую организацию климата достаточно очевиден. С одной стороны, это статистически устойчивые пространственные структуры, порождаемые атмосферной циркуляцией, а с другой – воздействие на климатические переменные подстилающей поверхности, и, в первую очередь, рельефа. Рассмотрим решение задачи выделения иерархических уровней на основе двухмерного спектрального анализа на примере первой основной компоненты [11]. Двухмерный спектр переводится в одномерное отображение через среднее значение мощности спектра для каждого волнового числа. Оценка фрактальной размерности строится на основе параметров уравнения $\ln S_p = a - b \cdot \ln(1/P)$, где P – период колебания. Фрактальная размерность $D = (7 - b)/2$. На рис. 3 показан двухмерный спектр, а в табл. 4 параметры статистической модели зависимости мощности спектра от периода.

Как следует из материалов табл. 3, мощность спектра с очень высокой точностью описывается логарифмом от $1/P$, а фрактальная размерность равна $(D) = (7 - 2.914)/2 = 2.043$. Однако даже визуальный анализ рис. 3 показывает, что полная зависимость не линейна. Таким образом, можно полагать, что климатическая система, выраженная через первую компоненту, семифрактальна [9], и в общей зависимости “период–спектр”

Таблица 3. Зависимость спектральной плотности от периода колебания $\ln(S_p) = b_0 + b_1 \cdot \log(1/P)$, $R^2 = 99.22\%$

Параметр	b_0	b_1
Оценка	-12.267	-2.914
Среднеквадратическая ошибка	0.033	0.017
t -критерий	-369.7	-169.6
-95%	-12.332	-2.948
+95%	-12.202	-2.881
Вероятность нулевой гипотезы	0.000	0.000

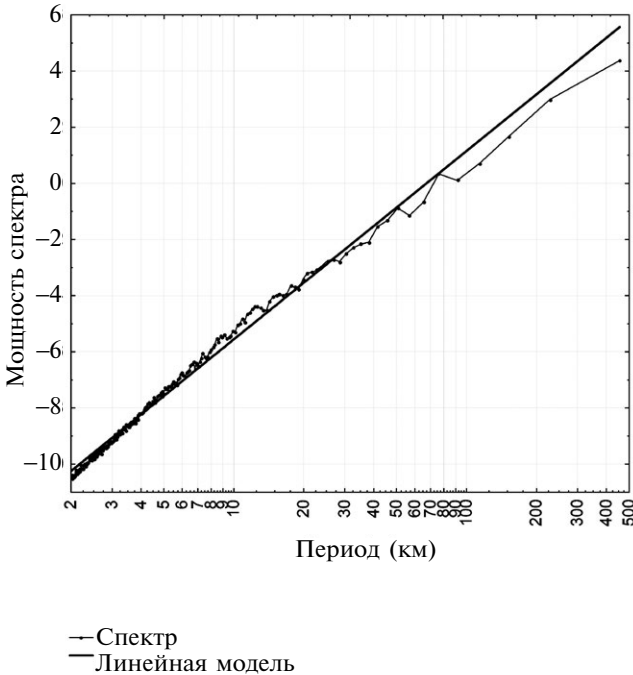


Рис. 3. Двухмерный спектр первой компоненты.

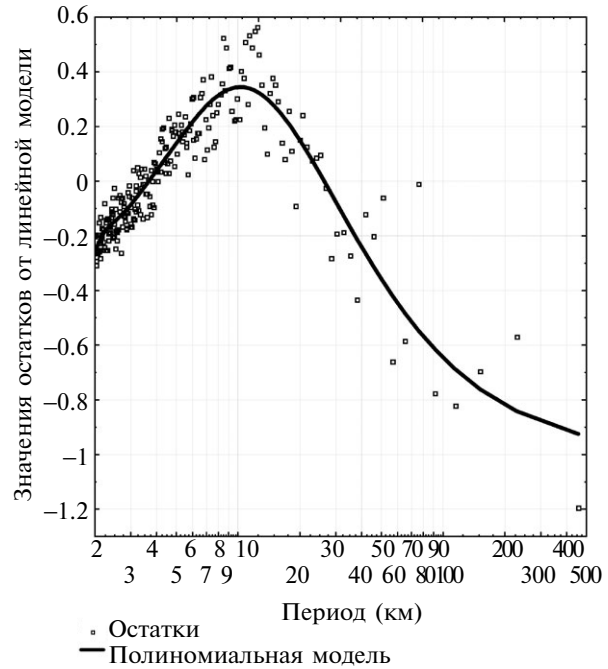


Рис. 4. Остатки от линейной зависимости логарифма мощности спектра от периода и их полиномиальная аппроксимация.

Таблица 4. Зависимость спектральной плотности от периода колебания для двух фрактальных множеств, образующих семи-фрактал

Параметр	Период >10 км, $R^2 = 99.421\%$		Период 3–10 км, $R^2 = 98.91\%$	
	b_0	b_1	b_0	b_1
Оценка	-10.84	-2.48	-12.66	-3.23
Среднеквадратическая ошибка	0.097	0.028	0.054	0.033
t -критерий	-111.4	-85.9	-234.8	97.04
-95%	-11.04	-2.54	-12.7	3.16
+95%	-10.65	-2.42	-12.5	3.29
Вероятность нулевой гипотезы	0.000	0.0000	0.000	0.00000

можно выделить линейные интервалы, отражающие различный генезис пространственных структур, и соответствующие им иерархические уровни. Ранее [5] был показан строгий метод выделения составляющих семи-фрактал. Здесь же используем более простой метод. Для этого опишем отклонения от линейной модели полиномом высокой степени. Получаем, что полином седьмой степени описывает значения остатков с $R^2 = 0.84$. На рис. 4 показан вид этой зависимости. Видно, что можно выделить два процесса: с периодами больше и меньше 10 км. В области низких периодов от 2 до 3 км существует существенная нелинейность, но она в силу малой

мощности спектра в области этих периодов может быть исключена из анализа.

Действительно, оценив спектр для интервала периодов больше десяти километров и от трех до десяти километров, получаем строго линейные отображения спектра от периода.

Фрактальные размерности этих двух подмножеств существенно различаются. Для множества с периодами больше 10 км $D = 2.26$, что близко к так называемому “черному шуму”, а для второго множества $D = 1.885$, что указывает на размерность пространства меньше двух и несоответствие этого подмножества формальному критерию фрактальности, которое по условию

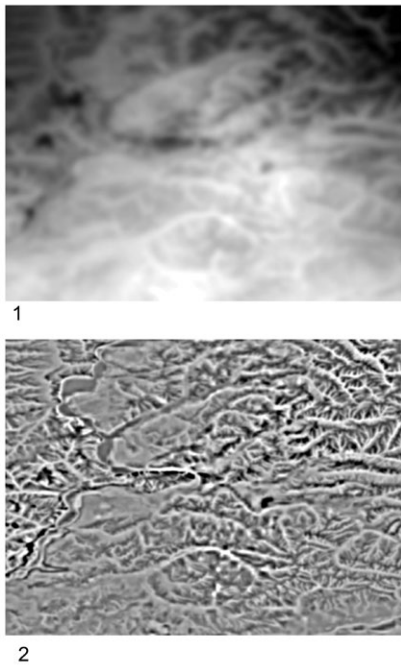


Рис. 5. Два иерархических уровня пространственного варьирования первой компоненты.

1 – Уровень с периодами больше 10 км ($D = 2.26$).
 2 – Уровень в интервале 3–10 км ($D = 1.885$).

для двумерного отображения должно быть равно или больше двум. Физически это означает, что логарифм мощности спектра очень слабо увеличивается с увеличением периода.

С помощью обратного преобразования Фурье выделяем два иерархических уровня пространственного варьирования первой компоненты (рис. 5). Очевидно, что первый уровень с одной стороны отражает некоторый общий зональный тренд изменения значений компоненты, а с другой – независимые от него пространственные структуры в целом, по-видимому, связанные с макроформами рельефа. Вторым уровнем, очевидно, в основном отражает структуру речной сети.

Отношение строго фрактально если в остатках от фрактальной модели нет регулярных составляющих спектра. Наличие регулярных составляющих указывает на существование субгармонических колебаний, обычно порождаемых многокомпонентной нелинейной автоколебательной системой. На рис. 6 показано, что варьирование отклонений остатков от полиномиальной модели не случайно, и в частности достоверно воспроизводятся двумя системами автоколебаний с демпфированием. На рис. 7 в спектре остатков по максимальным

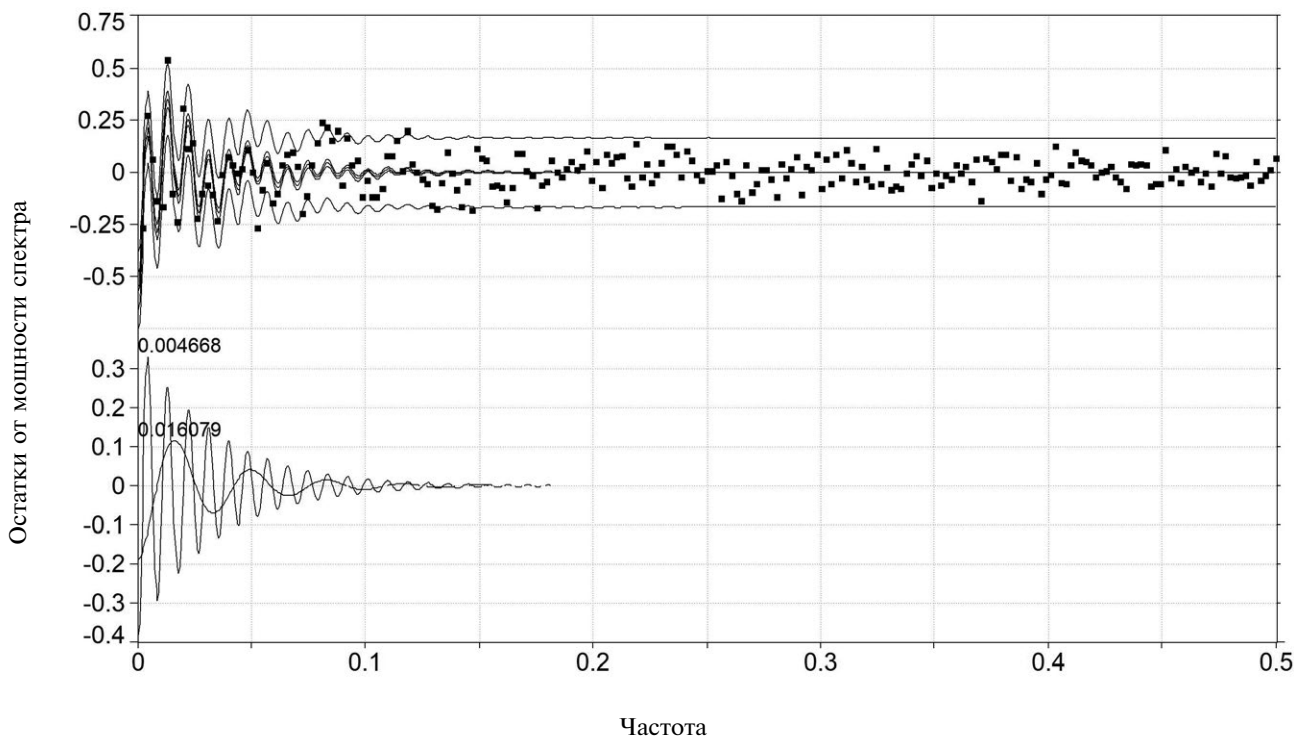


Рис. 6. Воспроизведение субгармонических колебаний в остатках от semifрактальной модели двумя нелинейными автоколебательными процессами. $R^2 = 0.26$. Среднеквадратическая ошибка – 0.08. Точки на верхнем графике – остатки спектра. Нижний график – две субгармоники с периодами, порождающие колебания 205.4 и 62.2 км.

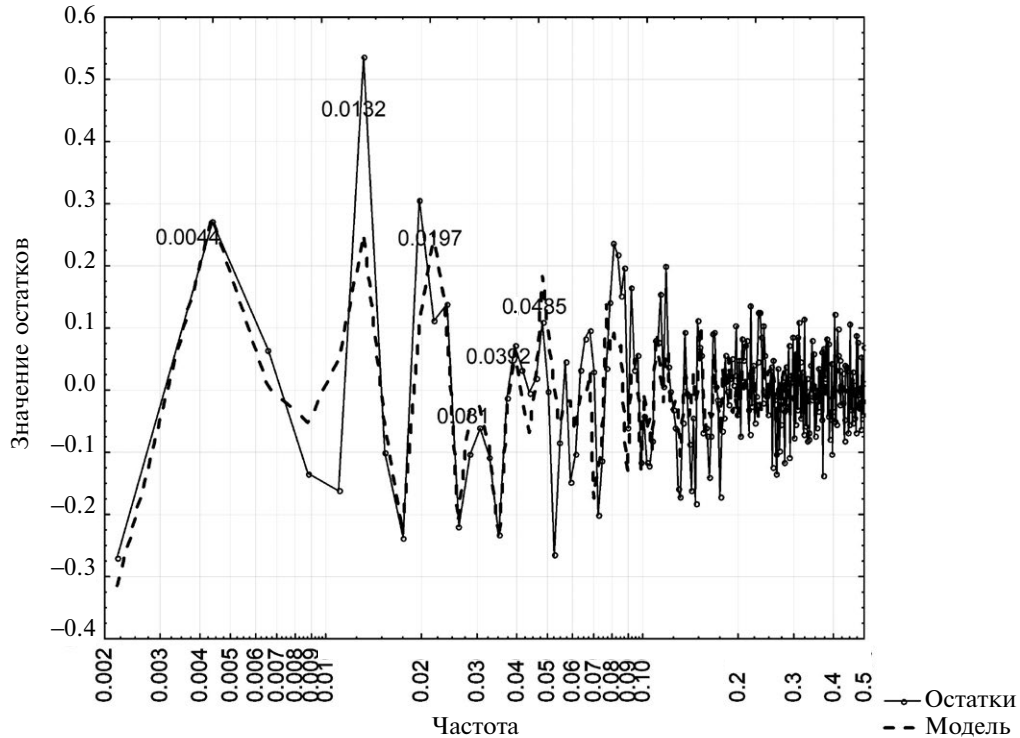


Рис. 7. Полный спектр субгармоник, генерируемый шестью независимыми автоколебательными системами (цифры около пиков – начальная частота субгармоник).

значениям спектра и регрессионной модели выделены субгармоники. Теоретически частоты f_i субгармоник описываются $f_i = f_0 i$, где i – номер гармоники. Из рис. 8 видно, что это соотношение строго выдерживается и $f_i = 0.0083i$, то есть генерирующая волна имеет линейные размеры около 120 км. Таким образом, каждой субгармонике можно поставить в соответствие иерархический уровень пространственной организации первой компоненты со следующими интервалами в километрах: больше 112, 57–112, 38–57, 29–38, 23–29, 19–23, 17–19, 13–17 и 11–13 км. С помощью обратного преобразования Фурье

отобразим пространственные структуры климата соответствующие этим гармоникам, объединив попарно четвертую и пятую, шестую и седьмую, восьмую и девятую гармоники (рис. 9). В табл. 4 как раз показан вклад двух фрактальных множеств и гармоник в первую компоненту и, следовательно, в значения определяемой ею переменных.

Как следует из табл. 5, наибольший вклад в варьирование компоненты и соответствующих ей климатических переменных вносит наивысший иерархический уровень. Чем меньше масштаб уровня, тем меньше его вклад. Совокупность ие-

Таблица 5. Мультирегрессионная модель первой главной компоненты от совокупности иерархических уровней

Уровень (км)	R^2	b -стандарт.	Std.Err	b	Std.Err	t
Больше 112	0.897	0.933	0.000	0.985	0.000	3072.150
58–112	0.488	–0.092	0.001	–0.132	0.001	–142.124
38–58	0.223	0.265	0.001	0.561	0.002	234.008
23–38	0.127	–0.166	0.002	–0.465	0.005	–100.658
16–23	0.094	0.263	0.002	0.861	0.006	153.079
10–16	0.078	–0.065	0.001	–0.233	0.004	–64.142
Меньше 10	0.056	0.177	0.000	0.746	0.002	493.823
10–400	0.980	0.976	0.000	0.986	0.000	8590.509
Меньше 10	0.056	0.127	0.000	0.538	0.000	1121.283

Примечание. $R^2 = 0.999$.

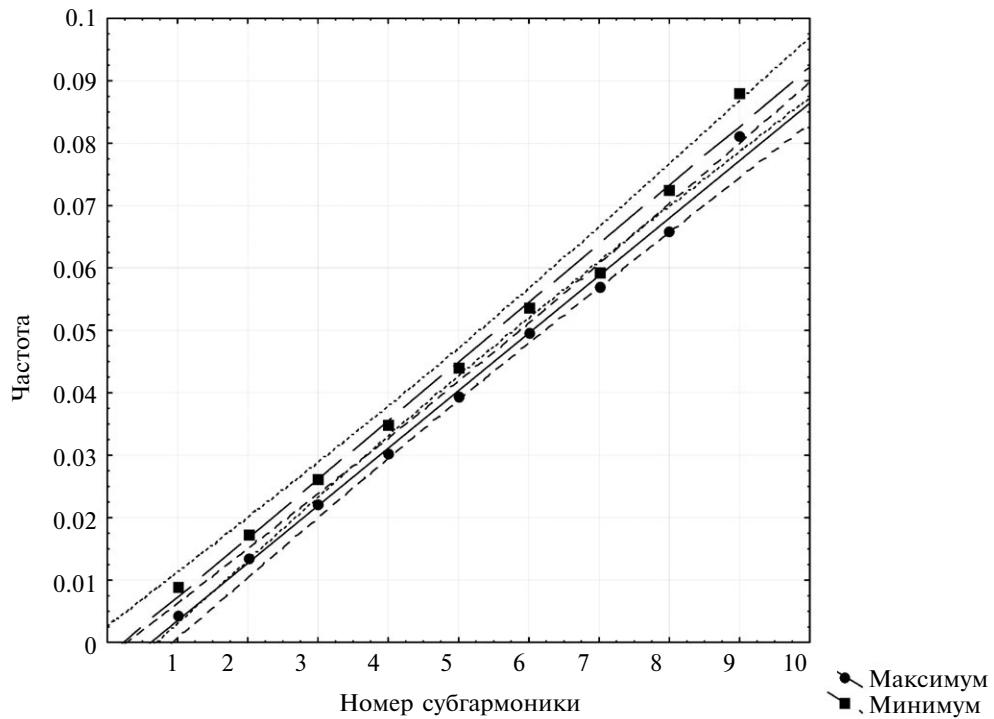


Рис. 8. Линейная связь между номером гармоники и максимальной (минимальной) частотой.

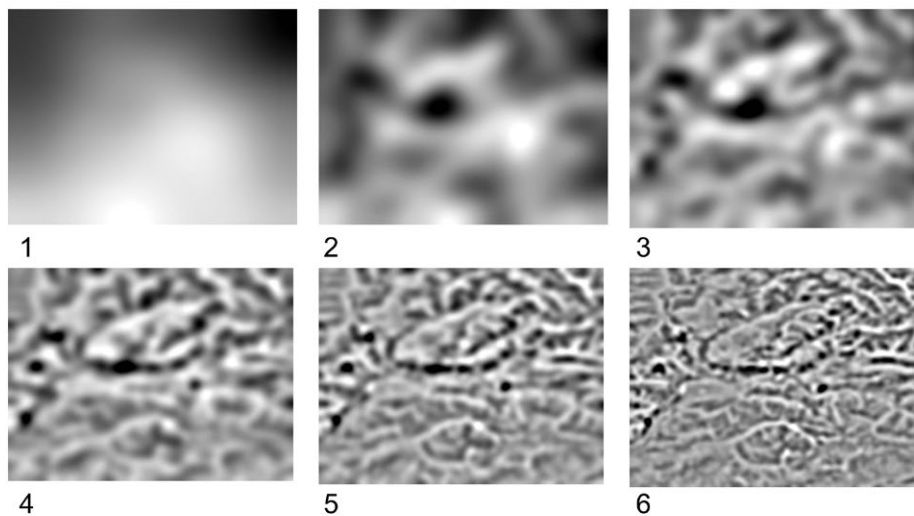


Рис. 9. Иерархическая организация первой компоненты климата.
 Период: 1 – >112 км, 2 – 57–112, 3 – 38–57, 4 – 23–38, 5 – 16–23, 6 – 10–16.

рархических уровней в мультирегрессионной модели содержит избыточную информацию, в результате чего эти избыточные переменные входят с малым весом и отрицательным знаком при реальной парной положительной корреляции. Это определяется тем, что иерархические уровни, выделяемые на основе субгармоник, частично вложены друг в друга и попарно положительно

коррелируют (0.7–0.8). Очевидно, что первый иерархический отражает общий тренд изменения климатических переменных, связанных с первой компонентой. Она выделяет две области минимума и максимума. Вторая компонента выделяет несколько областей максимума и минимума, относительно регулярно сменяющих друг друга по территории. В третьем уровне намечается

связь пространственного варьирования с рельефом, а три других показывают последовательную детализацию влияния рельефа на климат. Следует отметить, что в преобразовании Фурье совокупностью субгармоник описываются сильно асимметричные поверхности. Конечно, механизмы возникновения асимметричных структур могут быть самыми различными, и в какой-то степени их действия отражаются в субгармониках. Исходя из этого, один иерархический уровень может порождаться несколькими близкими субгармониками. Обращаясь к исходной интерполяционной модели, воспроизводящей варьирование в пространстве климатических переменных, можно ожидать, что она отражает их изменения как зависимые, так и независимые от рельефа, но в ней нет собственных артефактов, порождающих асимметричные пространственные структуры и связанные с ними субгармоники.

Аналогичным образом исследуем структуры оставшихся пяти главных компонент и приведем обобщающие результаты. В табл. 6 приведены фрактальные размерности в целом для каждой главной компоненты и составляющих их фрактальных подмножеств. Величины фрактальных размерностей показывают, что в целом пространственное варьирование переменных соответствуют черному шуму, то есть контрастность в пространстве значений переменных не

велика. Практически все размерности для интервала с периодами меньше 10 км, меньше двух. Существенно меньше 2 (около 1.5) она у второй компоненты, отражающей в первую очередь пространственное варьирование температур в декабре—январе, и у пятой компоненты (температура февраля). На рис. 10 приведено сравнение спектров для третьей (варьирование парциального давления влаги в летние месяцы) и пятой компоненты. У третьей компоненты варьирование точно соответствует черному шуму, а у пятой существенно меньше 2. График показывает, как соответствует масштаб пространственного варьирования размерности. При размерности 1.5 увеличение амплитуды по мере увеличения масштаба существенно меньше, чем при размерности 2 и, соответственно, меньше пространственная контрастность значений соответствующей переменной. Анализ показывает, что для всех переменных можно выделить субгармоники, отражающие их иерархическую организацию (табл. 7).

Как следует из табл. 7, наиболее сложно иерархически организована первая компонента. Остальные компоненты подразделяются на три—пять иерархических уровней. Рассчитаем для каждой компоненты пространственное варьирование для каждого уровня. В результате получаем основу для оценки пространственного

Таблица 6 Фрактальные размерности 6 главных компонент климата

Компонента	В целом	Более 10 км	3–10 км	Более 14 км	5–14 км	3–5 км
Первая	2.043	2.260	1.885	—	—	—
Вторая	1.902	2.307	1.560	—	—	—
Третья	2.146	2.374	2.016	—	—	—
Четвертая	2.058	2.219	1.890	—	—	—
Пятая	1.926	2.360	1.482	—	—	—
Шестая	1.986	—	—	2.351	1.810	1.499

Таблица 7. Нижние границы субгармоник и соответствующий им интервал в км

Уровень	Первая		Вторая		Третья		Четвертая		Пятая		Шестая	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	112		91		91		57		65		76	
2	58	55	33	58	41	49	21	36	33	32	33	43
3	38	20	16	16	15	26	10	11	17	16	19	14
4	29	9	10	6	10	5	—	—	13	3	14	5
5	23	6	—	—	—	—	—	—	10	3	—	—
6	19	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	17	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	14	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	11	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. 1 – нижняя граница, 2 – интервал субгармоники (иерархического уровня).

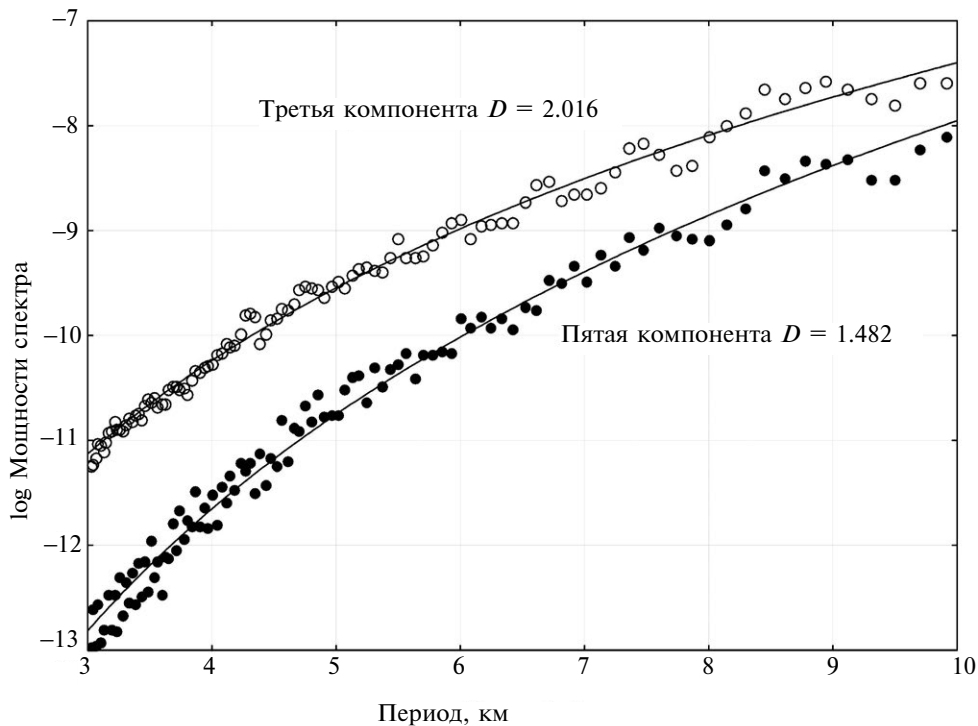


Рис. 10. Зависимость логарифма мощности спектра от периода при фрактальной размерности на уровне черного шума (третья компонента) и размерности существенно меньше 2 (пятая компонента) для периода меньше 10 км.

варьирования любой климатической переменной от 6 компонент для избранного иерархического уровня. Так как климатические переменные являются факторами, определяющими функционирование естественных и сельскохозяйственных систем, выделив иерархические уровни, получаем возможность оценить, какие из них вносят наибольший вклад в определение функционирования экосистем.

Примеры оценки варьирования температуры и осадков для основных иерархических уровней мезоклимата

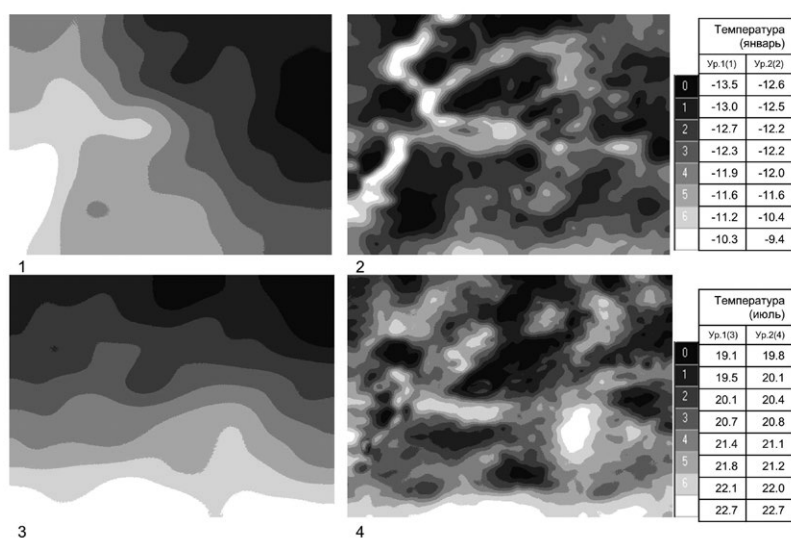
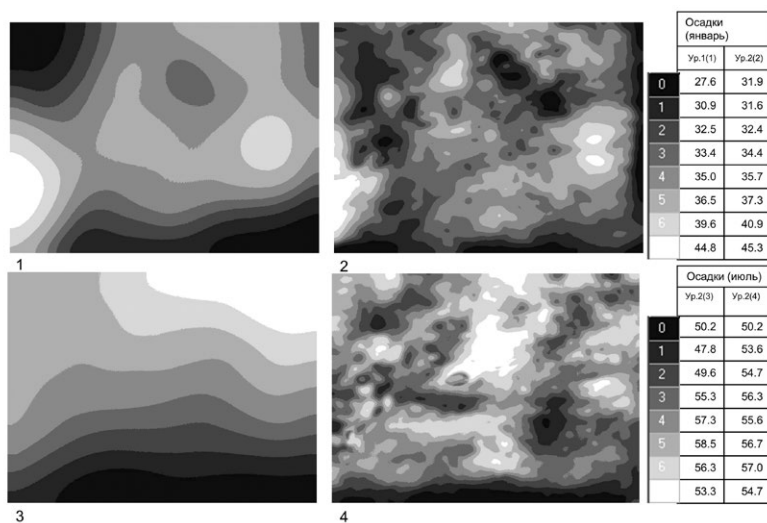
Как следует из табл. 7, для всех переменных можно выделить общий иерархический уровень с линейными размерами больше 58–57 км. Второй иерархический уровень соответствует интервалу 57–21 км и третий – 10–21 км. Уровень с линейными размерами меньше 10 км вносит очень малый вклад в варьирование климатических переменных (см. табл. 5) и в целях компактности изложения им можно пренебречь. Используя мультирегрессию, можно рассчитать любую переменную как функцию значения компонент соответствующего уровня. Приведем расчеты средней температуры и осадков для января и июля. Как следует из табл. 8, третий иерархический уровень вносит минимальный вклад в описание варьирования избранных переменных с наибольшей среднеквадратической ошибкой и минимальной амплитудой. Первый иерар-

хический уровень с линейными размерами больше 57 км во всех случаях вносит наибольший вклад в описание общего варьирования, однако второй уровень описывает варьирование температуры с той же амплитудой, что и первый, а варьирование осадков даже с большей амплитудой.

На рис. 11 показано, что поле температур на двух уровнях имеет существенно различную конфигурацию в январе и июле. Первый уровень отражает секторальное изменение поля температур зимой и почти зональное летом. На втором уровне зимой выявляется существенное утепляющее влияние долин крупных рек. Летом очевидная связь с рельефом отсутствует. Максимумы температур, в общем, приурочены к относительно возвышенным поверхностям. Еще более сложно распределение осадков. В январе на первом уровне максимум осадков выделяется в юго-западной части региона. Локальный максимум выделяется и в восточной части. Минимумы осадков выделяются на юге и северо-востоке. Летом на первом уровне осадки почти зонально уменьшаются с северо-востока на юг. На втором уровне “поле осадков” как зимой, так и летом, очень сложно без видимой связи с рельефом. Зимой выделяется четыре изолированных относительных максимумов осадков, разделяемых хорошо выраженными депрессиями. Летом максимумы и минимумы осадков так же сменяют друг друга по территории, но их конфигурация существенно иная.

Таблица 8. Параметры мультирегрессии для температуры и осадков января и июля для 3 иерархических уровней

Переменная	Уровень	R^2	Error	Амплитуда	Мин.	Макс.
Температура января	1	0.702	0.51	3.77	-13.88	-10.11
	2	0.270	0.80	3.77	-13.52	-9.75
	3	0.127	0.87	2.91	-13.23	-10.32
Температура июля	1	0.925	0.32	4.67	18.64	23.31
	2	0.315	0.98	4.47	18.84	23.31
	3	0.068	1.14	2.89	19.29	22.18
Осадки января	1	0.860	1.31	19.33	27.25	46.58
	2	0.528	2.41	21.79	25.86	47.65
	3	0.105	3.32	12.54	29.57	42.11
Осадки июля	1	0.898	2.73	31.41	38.48	69.89
	2	0.325	7.06	35.29	37.70	72.99
	3	0.016	8.52	11.11	50.54	61.65

**Рис. 11.** Пространственное варьирование температуры в январе на первом (1) и втором (2) уровнях и в июле (3 – первый уровень, 4 – второй уровень).**Рис. 12.** Пространственное варьирование суммы осадков в январе на первом (1) и втором (2) уровнях и в июле (3 – первый уровень, 4 – второй уровень).

Вместе с тем в самой южной части территории, по-видимому, проходит зональная граница климата, маркируемая резким уменьшением осадков, как зимой, так и летом.

Таким образом, поля температур и осадков демонстрируют на иерархическом уровне 21–57 км сложную пространственную структуру, которая может существенно определять функционирование различных компонентов экосистем.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает факт иерархической организации мезоклимата региона. Можно полагать, что существование этих уровней определяется совместным действием разных климатообразующих процессов, обсуждение которых выходит за рамки данной статьи. Показано, что любую климатическую переменную можно достаточно точно описать на каждом уровне шестью инвариантами (главными компонентами). Это в свою очередь позволяет существенно улучшить качество статистических моделей (мульти регрессионный, дискриминатный анализ, метод нейронных сетей), описывающих различные состояния экосистем (биологическая продуктивность, состояние почв, распространение и представительность различных видов растений и животных в сообществах, норму урожая различных сельскохозяйственных культур) от параметров климата, представленных инвариантами. Реально различаемые процессы в разной степени могут определяться уровнями каждого инварианта. Если строится регрессионная модель без учета иерархического уровня, то в любой статистической модели уровни, оказывающие малое влияние на рассматриваемое явление, создают шум и существенно снижают качество модели. Кроме того, при иерархическом представлении климатических инвариантов получаем возможность определить иерархический уровень, к которому наиболее чувствительно исследуемое явление. Такой эффект был получен в результате исследования зависимости структуры лесных экосистем от свойств рельефа, рассчитанных для разных иерархических уровней [5].

Можно полагать, что использование информации об иерархической организации мезоклимата и рельефа в построении статистических моделей, связывающих с ними экосистемные функции, позволит избежать использования условных, полуэвристических категорий, таких, например, как “местоположение”, вводимое в статистический анализ при интерполяции урожая сельскохозяйственных культур [8].

Предлагаемый подход к сжатию и расслоению по иерархическим уровням информации, содержащейся в базе данных WordClim, позволяет

с одной стороны визуализировать варьирование мезоклимата на разных иерархических уровнях, учитывать это варьирование в ходе хозяйственного использования территории, а с другой создает единую основу для построения статистических моделей экосистемных процессов или моделей урожайности различных сельскохозяйственных культур. Более того, такие модели позволят отразить равновесные (нормативные) отношения между исследуемыми экосистемными процессами и текущим состоянием климата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы Госзадания Института географии РАН № 0148-2019-0007 «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования» (вычислительное программирование) и при поддержке гранта РНФ 18-17-00129 (анализ данных).

FUNDING

The work was performed under the theme of the State Project of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. 0148-2019-0007 “Assessment of physiographic, hydrological and biotic environmental changes and their consequences for laying the foundations for sustainable environmental management” (computational programming) and with the support of the grant of the Russian Science Foundation 18-17-00129 (data analysis).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаченко А.Г.* Введение в экологическую географию // Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2003. 192 с.
2. *Пузаченко Ю.Г.* Инварианты динамической геосистемы // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 6–16.
3. *Пузаченко Ю.Г.* Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с.
4. *Пузаченко Ю.Г.* Организация ландшафта // Вопр. географии. № 138. М.: Изд. дом “Кодекс”, 2014. С. 35–65.
5. *Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю.* Мультиспектральная дистанционная информация в исследовании лесов // *Лесоведение*. 2014. № 7. С. 838–854.
6. *Пузаченко Ю.Г., Алещенко Г.М., Онуфреня И.А.* Анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.
7. *Солнцев Н.А.* Учение о ландшафте: Избранные труды. М.: Изд-во МГУ, 2001. 383 с.
8. *Шарая Л.С.* Прогнозное ландшафтно-экологическое картографирование (методологические аспек-

- ты) // Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. Тольятти. 2017. 246 с.
9. Dauphine A. *Fractal geography*. London: ISTE; Hoboken, NJ: Wiley, 2012. 241 p.
 10. Fick S.E., Hijmans R.J. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *Int. J. of Clim.* 2017. doi:10.1002/joc.5086.
 11. Turcotte D.L. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. NY: Cornell Univ., 1997. 418 p.
 12. Xu T., Hutchinson M.F. New developments and applications in the ANUCLIM spatial climatic and bioclimatic modelling package // *Env. Model. and Softw.* V. 40. 2013. P. 267–279.

REFERENCES

1. Isachenko A.G. *Vvedenie v ekologicheskuyu geografuyu* [Introduction to Ecological Geography]. St. Petersburg: S.–Peterburg. Gos. Univ., 2003. 192 p.
2. Puzachenko Yu.G. Invariants of dynamic geosystem. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 5, pp. 6–16. (In Russ.).
3. Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical Methods in Ecological and Geographical Research]. Moscow: Akademiya Publ., 2004. 416 p.
4. Puzachenko Yu.G. Landscape Organization. In *Voprosy Geografii. Sb. 138: Gorizonty landshaftnoi nauki* [Problems of Geography. Vol. 138: Horizons of Landscape Science]. Moscow: Kodeks Publ., 2014, pp. 35–65. (In Russ.).
5. Puzachenko Yu.G., Sandlersky R.B., Krenke A.N., Puzachenko M.Yu. Multispectral remote information in forest research. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2014, vol. 7, no. 7, pp. 838–854.
6. Puzachenko Yu.G., Aleshchenko G.M., Onufrenya I.A. Analysis of the hierarchical organization of relief. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2002, no. 4, pp. 29–38. (In Russ.).
7. Solntsev N.A. *Uchenie o landshafte: izbrannye tr.* [The Doctrine of Landscape: Selected Works]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2001. 383 p.
8. Sharaya L.S. Forecasting landscape-ecological mapping (methodological aspects). *Doctoral (Biol.) Dissertation*. Tolyatti: the Inst. of Ecol. of the Volga basin of Russian Academy of Sciences, 2017. 246 p.
9. Dauphine A. *Fractal Geography*. London: ISTE; Hoboken: Wiley, 2012. 241 p.
10. Fick S.E., Hijmans R.J. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2017, vol. 37, no. 12, pp. 4302–4315.
11. Turcotte. D.L. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge Univ. Press, 1997. 2d ed. 418 p.
12. Xu T., Hutchinson M.F. New developments and applications in the ANUCLIM spatial climatic and bioclimatic modelling package. *Environ. Model. Softw.*, 2013, no. 40, pp. 267–279.

Spatial Organization of Regional Mesoclimate

A. N. Krenke^{1,*}, Yu. G. Puzachenko², and M.Yu. Puzachenko¹

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: Krenke-igras@yandex.ru

Received October 12, 2017; revised December 26, 2018; accepted January 24, 2019

In this article the method of derivation of the hierarchical levels of organization of climatic variables or regional scale is considered. Based on the Worldclim database, the main integral factors reflecting the variation of climatic variables are identified, and then decomposed into hierarchical levels with different linear dimensions of oscillations. Hierarchical levels are distinguished through the study of the fractal dimensions of different parts of the spectrum of the obtained factors and the isolation of subharmonics on the basis of an analysis of the residues of the fractal model. The analysis shows the existence of a complex hierarchical organization of the region's mesoclimate. The approach makes it possible to identify the most significant scales and amplitudes of fluctuations in climatic variables, both for natural and for agricultural ecosystems. Differentiation of the variation of climatic variables at different spatial scales and the influence of these elements on a specific ecosystem object creates a basis for constructing statistical models of ecosystem processes or yield patterns of various agricultural crops. The possibilities of visualization of climate variation at different hierarchical levels and reflection of equilibrium (normative) relations between the studied ecosystem processes and the current state of climate in the region are shown.

Keywords: climate, hierarchy, landscape, statistical modeling, ecosystem processes.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-556620193116-130>