

10.12737/article_5cb82803eea7e0.35150372

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ И ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС В ДИНАМИКЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЕРРИТОРИИ Г. СУРГУТА

С.Н. РУСАК, Л.М. БИКМУХАМЕТОВА, И.И. ВАРЛАМ

*БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет», ул. Ленина, 1, Сургут,
Россия, 628400, e-mail: svetlana_01.59@mail.ru*

Аннотация. В настоящей статье проанализирована вариабельность метеопараметров, показана выраженность детерминированной и стохастической составляющих хаотических рядов среднесуточных температур воздуха на примере территории г. Сургута методом идентификации параметров квазиаттракторов в фазовом пространстве признаков в рамках теории хаоса-самоорганизации, а также с позиций использования вейвлет-анализа для оценки короткопериодной составляющей динамики погодно-климатических процессов. Процедура идентификации размерности квазиаттрактора в m -мерном пространстве признаков и анализ вейвлет-спектра выявил усиление детерминированного хаоса, проявляющегося длительными периодами относительно стабильной температуры с последующим резким ее изменением (динамика «типа меандр»).

Ключевые слова: вейвлет-анализ, детерминированный хаос, аттрактор, динамика метеопараметров.

WAVELET ANALYSIS AND DETERMINISTIC CHAOS IN THE DYNAMICS OF METEOROLOGICAL FACTORS IN THE CITY OF SURGUT

S.N. RUSAK, L.M. BIKMUKHAMEDOVA, I.I. VARLAM

Surgut state University, Lenin pr., 1, Surgut, Russia, 628400, e-mail: svetlana_01.59@mail.ru

Abstract. This article analyzes the variability of meteorological parameters, shows the severity of deterministic and stochastic components of chaotic series of average daily air temperatures using the example of the territory of Surgut by identifying the parameters of quasi-attractors in the phase space of features within the theory of chaos-self-organization, as well as from the standpoint of using wavelet analysis to assess the short-period component of the dynamics of weather and climate processes. The procedure for identifying the dimension of a quasi-attractor in the m -dimensional feature space and analyzing the wavelet spectrum revealed an increase in deterministic chaos, manifested by long periods of relatively stable temperature followed by a sharp change (dynamics of the «meander type»).

Key words: wavelet analysis, deterministic chaos, attractor, meteorological parameters.

Введение. В последнее время огромный интерес к процессу математизации практически всех отраслей знаний по достоинству занимают методы, основанные на теории оптимального оценивания. В решении задач прикладного характера, в частности, для описания, оценки или прогноза поведения погодно-климатических факторов с распределенными в пространстве и во времени параметрами, успешно применяются динамико-стохастические методы, теория хаоса и самоорганизации и вейвлет-анализ, где динамика метеорологических параметров рассматривается как конечная реализация статистически нестационарных случайных процессов [4,5,6]. На сегодняшний день четкие критерии в определении

стохастичности или хаотичности процесса как таковые отсутствуют, равно как и в разграничении подходов детерминистичности или стохастичности процесса. Другими словами, «хаос» и «порядок» рассматривается как классическая пара противоположностей, не существующих друг без друга, в своем противоречии определяющих развитие и движение всех динамических систем, однако эта многомерная система все-таки имеет циклический характер, т.е. **определенность** и **хаос** связаны между собой [4,14]. Системы находятся в постоянном движении и взаимодействии с внешней средой, перерабатывая информацию и осуществляя обратную связь. Стадии динамического покоя перемежаются со стадиями настолько

сложными, что производят впечатление полного и непредсказуемого хаоса. Многие биологические динамические системы (БДС) хаотичны, например, природные экосистемы или погодно-климатические факторы, переход природной системы из одного упорядоченного состояния в другое упорядоченное осуществляется с помощью промежуточного хаотического состояния. Порядок рождается из беспорядка в процессе самоорганизации, но в определенный момент «ослабленная» стабильностью система вновь дает рождение хаосу.

Спектр климатических колебаний очень разнообразен, и климатообразующие процессы проявляются с разной значимостью на различных временных масштабах, и создается впечатление, что функция спектральной плотности непрерывна и проверить это обстоятельство по эмпирическим данным, имеющим конечную длину и дискретность, очень сложно. Если данный факт действительно имеет место, то это означает существование «истинной стохастичности», причем квазиритмический характер пульсаций позволяет предполагать, что климатическая система способна генерировать стохастические автоколебания, а их образом в фазовом пространстве системы является так называемый «странный» аттрактор [5,6,8-11]. Атмосферные и климатические модели относятся, как правило, к классу нелинейных диссипативных систем. Такие системы обычно обладают глобальными аттракторами, т.е. компактными инвариантными притягивающими множествами, которые и являются носителями хаоса в этих системах. Так, крупные изменения климата могут пониматься как изменения характеристик аттрактора при изменении параметров системы. Изменчивость есть проявление временного хаоса, отвечающего движению системы по определенной фазовой траектории, принадлежащей аттрактору. Помимо этого, определенный вклад в изменчивость могут вноситься внешними воздействиями.

Объект и методы исследования. В работе представлена оценка многолетней динамики погодно-климатических условий г. Сургута, как представителя территории района Севера РФ. В качестве материала для исследования в данной работе использованы результаты ежедневных измерений метеопараметров с дискретизацией 4 часа за период 1991-2010 г.г. Обработка временных рядов метеопоказателей (температура, атмосферное давление, влажность атмосферного воздуха), оценка динамики этих параметров проведена как с позиций идентификации параметров квазиаттракторов (КА) в фазовом пространстве (ФП) признаков в рамках теории хаоса-самоорганизации (ТХС), где в качестве системы рассматривалась модель 3-х – мерного фазового пространства: параллелепипед, внутри которого находится КА вектора состояния параметров метеорологических показателей среды (температура воздуха $T=x_1$, давление атмосферы $P=x_2$ и относительная влажность $R=x_3$), которые являются координатами и образуют вектор $x=x(t)=(x_1, x_2, x_3)T$ состояния, динамику которого $x(t)$, можно непрерывно наблюдать, так и с применением вейвлет-анализа временных рядов. Следует отметить, что использование вейвлетного анализа в последнее время находит широкое применение в сфере естественных наук, в том числе в вопросах физики атмосферы или климатологии [5,6,10].

Результаты исследований и их обсуждение. Для большинства природных объектов и процессов, которые относят к открытым динамическим системам, характерны процессы самоорганизации и хаотичности: самоорганизация проявляется в установлении стабильных и продолжительных изменений состояния параметров этих систем, например, ритмов или пульсаций (рис. 1), хаотичность – в усложнении характера этих изменений вплоть до их исчезновения. Смена относительно упорядоченных или хаотических состояний также происходит то ритмично, то беспорядочно [1-5,13].

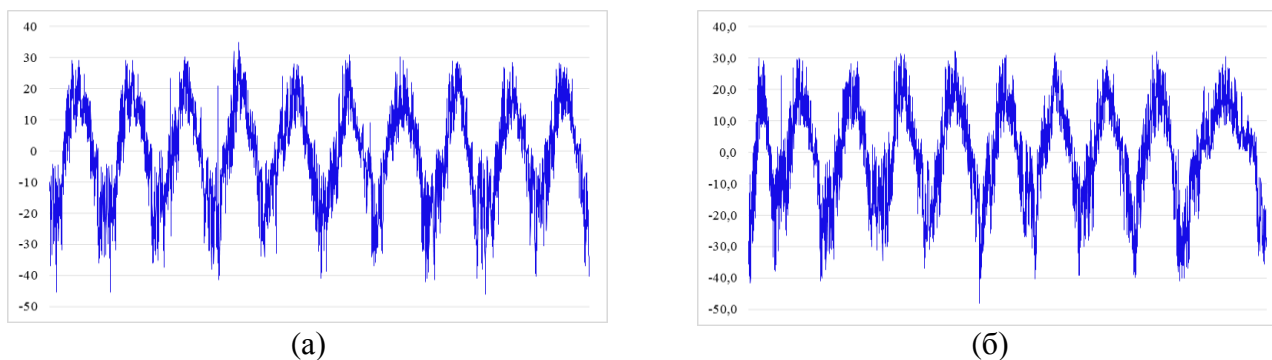


Рис. 1. Многолетняя динамика температуры для г. Сургута, где (а) период 1991-2000 г.г.; (б) – 2001-2010 г.г.

Сравнивая температурные колебания двух десятилетних периодов (рис. 1) для территории г. Сургута и Сургутского района, как представителей северной территории РФ, можно отметить значимую цирканнуальную цикличность, т.е. в целом динамика годового ритма температурного хода носит детерминированный характер. Наблюдаемые в последнее время периоды

длительной стабильности аномальной температуры со значительными ее изменениями в конце периода, позволяют предположить, что подобный характер динамики связан с определенной причинностью, в то время как на малом отрезке времени, например, месяц или сезон, температурная кривая хаотична (рис. 2).

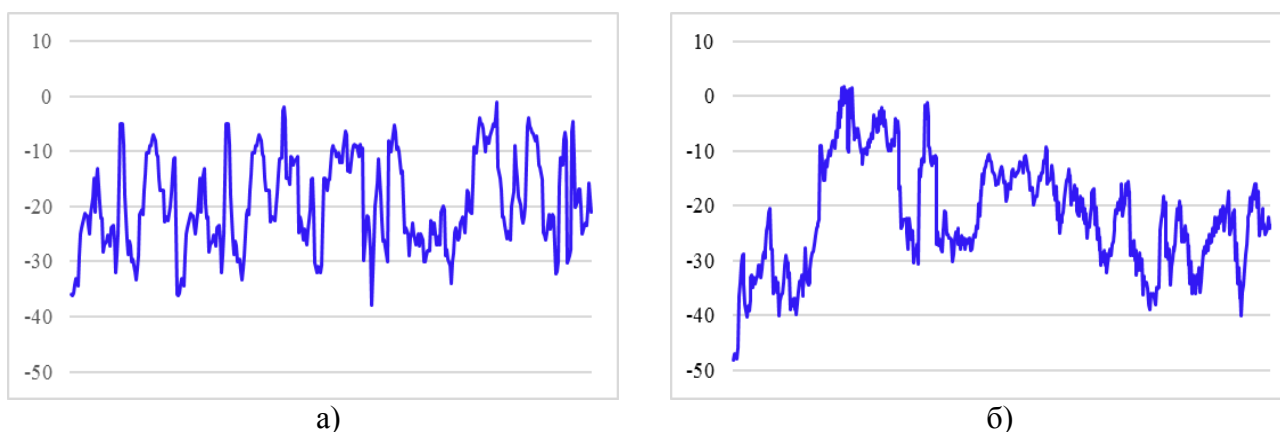


Рис. 2. Кривая температурного хода с выраженным проявлением детерминированного хаоса: (а) – зима 1991-1992 г.г.; (б) зима 2009-2010 г.г.

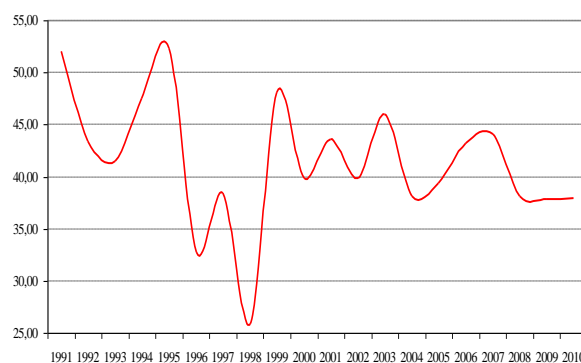
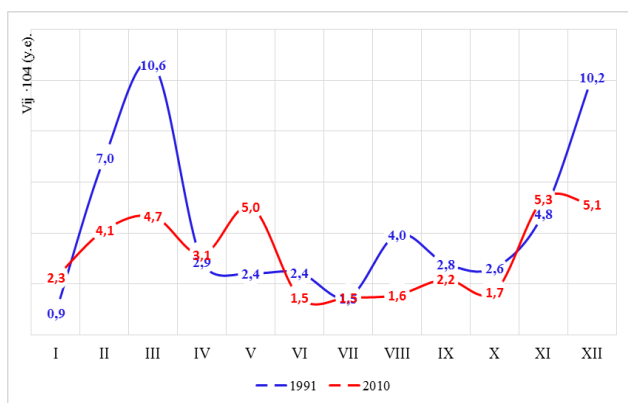
В отличие от классических способов математической статистики, методы анализа, основанные на идентификации размерности КА биологической динамической системы в многомерном фазовом пространстве состояний (ФПС), дают несомненное преимущество в оценке характера долговременных погодноклиматических изменений в условиях конкретной территории, а также позволяют визуализировать эти изменения в многомерном пространстве признаков путем построения их геометрических портретов-образов (КА) и определять значимые параметры порядка исследуемой

системы. Так, в частности, установленные количественные значения объемов КА вектора метеорологических показателей ДС, в нашем случае, позволили оценить меру и степень детерминированности и хаотичности в движении вектора состояния этой ДС [2,8,10-11].

Принимая во внимание экспериментальные данные многих современных исследований об охлаждении верхней тропосферы и стратосферы, а также возрастании разности температур между нижними и верхними атмосферными слоями, можно говорить об интенсификации проявления

детерминированного хаоса и меандрового характера динамики температуры [6,7,15-16]. Для проверки данного утверждения необходимо количественно оценить выраженность хаотической детерминированной составляющей для температурных рядов, наблюдаемых в разные годы. Данную процедуру можно осуществить путем восстановления аттрактора, представляющего собой множество точек, к которому стремится температура с течением времени в некотором лаговом пространстве, и вычисления размерности этого квазиаттрактора. Измеряя размерность КА, можно определить степень детерминированности процесса: чем размерность меньше, тем сильнее этот процесс детерминирован. С увеличением размерности аттрактора увеличивается

число степеней свободы системы, т. е. количество направлений, в которых может двигаться её фазовая траектория, а это приводит к возрастанию сложности и уменьшению предсказуемости временных рядов. На рисунке 3 представлена размерность объемов (\bar{v}_{ij} , у.е.) КА вектора состояния метеопараметров среды г. Сургута в годовой динамике за период наблюдений 1991-2010 г.г., где в качестве координат (x_i) фазового пространства состояний рассматриваются температура, атмосферное давление и влажность атмосферного воздуха. Эти три метеопараметра хаотически и непрерывно изменяются в пределах каждого месяца каждого сезона года, однако, этот хаос $x(t)$ имеет и определенные закономерности (гомеостатические) [1-4,8,11,13-14].



(а)

(б)

Рис. 3. Размерность объемов квазиаттракторов вектора состояния метеопараметров среды: (а) – сравнение значений объемов КА для разных месяцев года за 1991 г. и 2010 г.; (б) – суммарные годовые значения КА в многолетней динамике. Здесь: по оси ОХ (а) – месяцы года; по оси ОУ – значения объемов КА (\bar{v}_{ij} , у.е.)

Необходимо отметить, что дополнительные возможности для анализа детерминированной хаотической динамики временных рядов (например, метеопараметров) представляет вейвлет-анализ [12], обеспечивающий возможность выявить «детерминированный хаос» во временных рядах, который будет проявляться на плоскости в координатных осях «спектр хаотических колебаний – временной сдвиг» в виде линий

экстремумов коэффициентов вейвлет-анализа (скелетонов), имеющих древообразную форму [6,12].

Анализ временных рядов среднесуточной температуры за разные годы, в целом, демонстрирует увеличение выраженности ветвистой структуры скелетонов, начиная с 1991 г.: она приобретает более правильную форму и захватывает большие периоды спектра (рис. 4).

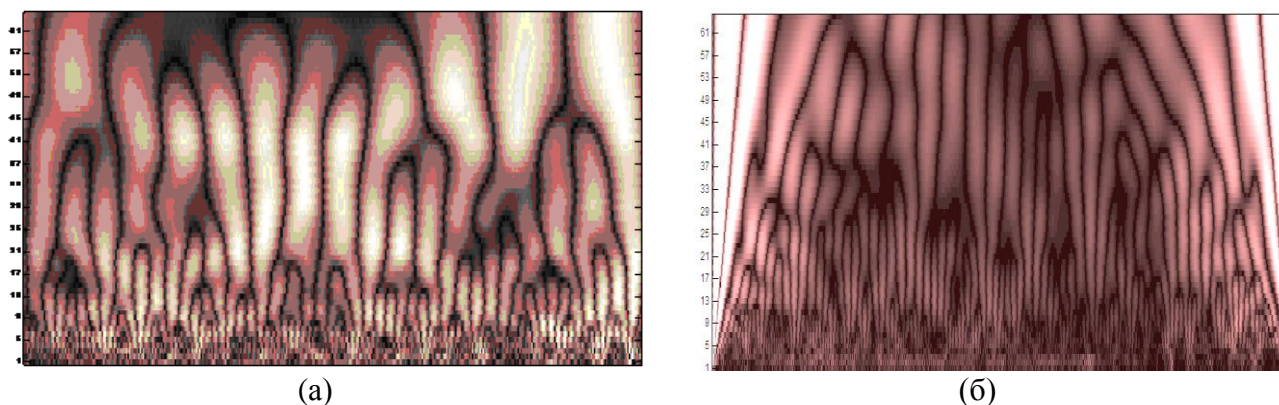


Рис. 4. Вейлет-диаграммы временных вариаций внутригодовой динамики температуры атмосферного воздуха для 1991 г. (а) и 2010 г. (б)

Не вызывает сомнения, что анализ региональных погодно-климатических вариаций представляется чрезвычайно важным, поскольку именно такие изменения могут оказывать значительное влияние, как на экономику регионов, так и на показатели здоровья населения, проживающих в этих отчасти дискомфортных условиях. В научной литературе в последнее время приводятся многочисленные свидетельства изменчивости хода метеорологических параметров, отмечаются тенденции положительного тренда температурных показателей атмосферного воздуха и снижение внутри – и межсуточных амплитуд, которые существенно разнятся для отдельных районов и территорий [2,7].

Выводы:

Важной особенностью динамики погодно-климатических рядов является их не стационарность и изменение не только характера поведения, но и статистической структуры от временной координаты, т.е. системы неживой природы (ДС) демонстрируют статистическую неустойчивость своих параметров.

Анализ вариабельности метеопараметров для территории г. Сургута за период 1991-2010 г.г. характеризует на фоне постоянно присутствующего стохастического хаоса усиление признаков некоторых других процессов, связанных с внутренней динамикой климатической системы. Данное обстоятельство позволяет предполагать, что климатическая система способна генерировать стохастические автоколебания.

Литература

1. Бетелин В.Б., Еськов В.М., Галкин В.А., Гавриленко Т.В. Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем // Доклады академии наук. – 2017. – Т. 472, № 6. – С. 642-644.
2. Брагинский М.Я., Еськов В.М., Лазарев В.В., Русак С.Н. Методы измерений соотношений между хаосом и стохастикой в оценке влияния динамики метеофакторов Югры на организм человека // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2010. – Т. 9, № 1. – С. 195-199.
3. Гребенюк Г.Н., Кузнецова В.П. Современная динамика климата и фенологическая изменчивость северных территорий // Фундаментальные исследования. – 2012. – Т. 11, № 5. – С. 1063-1077.
4. Еськов В.В. Эволюция систем третьего типа в фазовом пространстве состояний // Вестник кибернетики. – 2017. – Т. 27, № 3. – С. 53-58.
5. Зинченко Ю.П., Хадарцев А.А., Филатова О.Е. Введение в биофизику гомеостатических систем (Complexity) // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2016. – № 3. – С.6-15.
6. Нагорнов О.В., Никитаев В.Г., Простокишин В.М., Тюфлин С.А., Проничев А.Н., Бухарова Т.И., Чистов К.С., Кашафутдинов Р.З., Хоркин В.А. Вейлет-анализ в примерах: М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с.

7. Ревич Б.А., Терентьев Н.Е. Оценка влияния климатических изменений на здоровье населения Европейской части Российской Арктики // Управление риском. – 2015. – Т. 76, № 4. – С. 35-42.

8. Русак С.Н., Филатова О.Е., Горбунов Д.В., Бикмухаметова Л.М. Динамика погодно-климатических факторов в условиях метеорологической неопределенности на примере ХМАО - Югры // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2016. – № 1. – С. 38-44.

9. Русак С.Н., Филатова О.Е., Бикмухаметова Л.М. Неопределенность в оценке погодно-климатических факторов на примере ХМАО - Югры // Вестник новых медицинских технологий. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 15-19.

10. Русак С.Н., Филатова О.Е., Хоменушко Т.И., Куропаткина М.Г. Гомеостатический хаос метеопараметров Югры // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2018. – № 1. – С. 80-87.

11. Попов Ю.М., Русак С.Н., Бикмухаметова Л.М., Филатова О.Е. Хаотические методы оценки погодной динамики на примере ХМАО - Югры // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2017. – № 2. – С. 32-35.

12. Arneodo A., Argoul F., Bacry E., Elezgaray J. et al. Wavelet transform of fractals. In: Wavelets and Applications. Berlin: Springer, 1992. – Pp. 286-352.

13. Eskov V.V., Filatova O.E., Gavrilenko T.V. and Gorbunov D.V. Chaotic Dynamics of Neuromuscular System Parameters and the Problems of the Evolution of Complexity // Biophysics. – 2017. – Vol. 62, No. 6. – Pp. 961-966.

14. Eskov V.M., Filatova O.E., Eskov V.V. and Gavrilenko T.V. The Evolution of the Idea of Homeostasis: Determinism, Stochastics and Chaos - Self-Organization // Biophysics. – 2017. – Vol. 62, No. 5. – Pp. 809-820.

15. Duan A. Cooling trend in the upper troposphere and lower stratosphere over China // Geophysical Research Letters. – 2007. – Vol. 341, No. 15. – Pp. 1-4.

16. Fu Q., Johanson C.M., Warren S.G., Seidel D.J. Contribution of stratospheric cooling to satellite-inferred tropospheric

temperature trends // Nature. – 2004. – Vol. 429. – Pp. 55-58.

References

1. Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V. Stokhasticheskaya neustojchivost v dinamike povedeniya slozhnyh gomeostaticheskikh sistem [Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems] // Doklady akademii nauk [Doklady Mathematics]. – 2017. – Т. 472, № 6. – С. 642-644.

2. Braginskij M.Ya., Eskov V.M., Lazarev V.V., Rusak S.N. Metody izmerenij sootnoshenij mezhdu haosom i stokhastikoj v ocenke vliyaniya dinamiki meteofaktorov Yugry na organizm cheloveka [Methods of measurements of parities between chaos and stochastic in an estimation of influence of dynamics meteorological factors ugra on the organism of the person] // Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah [System analysis and management in biomedical systems]. – 2010. – Т. 9, № 1. – С. 195-199.

3. Grebenyuk G.N., Kuznecova V.P. Sovremennaya dinamika klimata i fenologicheskaya izmenchivost severnyh territorij [Modern dynamics of climate and phenological change of northern territories] // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. – 2012. – Т. 11, № 5. – С. 1063-1077.

4. Es'kov V.V. Evolyuciya sistem tret'ego tipa v fazovom prostranstve sostoyanij [Evolution of the third type systems in phase space state] // Vestnik kibernetiki [Herald of cybernetics]. – 2017. – Т. 27, № 3. – С. 53-58.

5. Zinchenko Yu.P., Hadarcev A.A., Filatova O.E. Vvedenie v biofiziku gomeostaticheskikh sistem (complexity) [Introduction to the biophysics of homeostatic systems (complexity)] // Slozhnost'. Razum. Postneklassika [Complexity. Mind. Postnonclassic]. – 2016. – № 3. – С. 6-15.

6. Nagornov O.V., Nikitaev V.G., Prostokishin V.M., Tyuflin S.A., Pronichev A.N., Buharova T.I., Chistov K.S., Kashafutdinov R.Z., Horkin V.A. Vejvlet-analiz v primerah: M.: NIYAU MIFI, 2010. – 120 s.

7. Revich B.A., Terent'ev N.E. Ocenka vliyaniya klimaticheskikh izmenenij na zdorov'e naseleniya Evropejskoj chasti Rossijskoj Arktiki [Key climate change impacts on human health in the European part of the Russian Arctic zone] // Upravlenie riskom [Risk management]. – 2015. – Т. 76, № 4. – С. 35-42.

8. Rusak S.N., Filatova O.E., Gorbunov D.V., Bikmuhametova L.M. Dinamika pogodno-klimaticheskikh faktorov v usloviyah meteorologicheskoy neopredelennosti na primere HMAO – Yugry [Dynamics of weather and climatic factors in the conditions of weather uncertainty on the example of Khanty-Mansi autonomous okrug – Ugra] // Slozhnost. Razum. Postneklassika [Complexity. Mind. Postnonclassic]. – 2016. – № 1. – С. 38-44.

9. Rusak S.N., Filatova O.E., Bikmuhametova L.M. Neopredelennost v ocenke pogodno-klimaticheskikh faktorov na primere HMAO - Yugry [Uncertainty in Pogodno's Assessment - Climatic Factors On the Example of Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Ugra] // Vestnik novyh medicinskih tekhnologij [Journal of new medical technologies]. – 2016. – Т. 23, № 1. –С. 15-19.

10. Rusak S.N., Filatova O.E., Homenushko T.I., Kuropatkina M.G. Gomeostaticheskij haos meteoparametrov Yugry [Homeostatic chaos of Ugra meteorological parameters] // Slozhnost. Razum. Postneklassika [Complexity. Mind. Postnonclassic]. – 2018. – № 1. – С. 80-87.

11. Popov Yu.M., Rusak S.N., Bikmuhametova L.M., Filatova O.E. Haoticheskie metody ochenki pogodnoj dinamiki na primere HMAO - Yugry [Chaotic methods of evaluation of weather dynamics by the example of Khanty-Mansiysk autonomous district – Ugra] // Slozhnost. Razum. Postneklassika [Complexity. Mind. Postnonclassic]. – 2017. – № 2. – С. 32-35.

12. Arneodo A., Argoul F., Bacry E., Elezgaray J. et al. Wavelet transform of fractals. In: Wavelets and Applications. Berlin: Springer, 1992. – Pp. 286-352.

13. Eskov V.V., Filatova O.E., Gavrilenko T.V. and Gorbunov D.V. Chaotic Dynamics of Neuromuscular System Parameters and the

Problems of the Evolution of Complexity // Biophysics. – 2017. – Vol. 62, No. 6. – Pp. 961-966.

14. Eskov V.M., Filatova O.E., Eskov V.V. and Gavrilenko T.V. The Evolution of the Idea of Homeostasis: Determinism, Stochastics and Chaos - Self-Organization // Biophysics. – 2017. – Vol. 62, No. 5. – Pp. 809-820.

15. Duan A. Cooling trend in the upper troposphere and lower stratosphere over China // Geophysical Research Letters. – 2007. – Vol. 341, No. 15. – Pp. 1-4.

16. Fu Q., Johanson C.M., Warren S.G., Seidel D.J. Contribution of stratospheric cooling to satellite-inferred tropospheric temperature trends // Nature. – 2004. – Vol. 429. – Pp. 55-58.