DOI: 10.12737/2306-174X-2024-2-45-62

МЕТАТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОМЕОСТАТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМ

А.К.ЧЕРКАШИН

ФГБУН «Институт географии им. В.Б.Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук», г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1, Россия, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки 664033

Аннотация. Реализуется метатеоретический подход к исследованию и моделированию гомеостатического поведения систем разного рода, основанный на математических методах касательного расслоения дифференциальной геометрии и статистической обработке пространственных и временных рядов данных с целью выявления эффектов трансформации функций связи их фазовых характеристик. Неизвестная системная функция связи послойно (постадийно) исследуется посредством выделения универсальных функций и индивидуальных характеристик положения центра (аттрактора) и ядра (квазиаттрактора). Наблюдаемая хаотичность обусловлена одновременным изменением координат положения начала и конца вектора изображения фазовых траекторий (годографов). Показано, как исследовательский опыт медицины, подкрепленный метатеоретическими знаниями, может быть перенесен в другие области знания для совершенствования методов изучения и объяснения гомеостатических явлений.

Ключевые слова: *метатеоретический анализ, гомеостатическое поведение, пространственные и временные ряды данных, преобразование Лежандра, расслоения на многообразиях, универсальные функции, структура касательного слоя.*

METATHEORETICAL FEATURES OF MODELING HOMEOSTATIC BEHAVIOR OF SYSTEMS

A.K. CHERKASHIN

V.B. Sochava Institute of Geography, Irkutsk, Ulan-Batorskaya St.1, Russia, 664033

Abstract. A metatheoretical approach to the study and modeling of the homeostatic behavior of systems of various kinds is been implemented, based on mathematical methods of tangent bundle of differential geometry and statistical processing of spatial and time series of data in order to identify the effects of transformation of the coupling functions of their phase characteristics. The unknown system function is investigated in layers (step by step) by means of the allocation of universal functions and individual characteristics of the positions of the center (attractor) and the core (quasi-attractor). The observed randomness is due to the simultaneous change in the coordinates of the position of the begin and end of the vector that depicts of phase trajectories (hodographs). It is shown how the research experience of medicine, supported by metatheoretical knowledge, can be transferred to other fields of knowledge to improve the methods of studying and explaining homeostatic phenomena.

Keywords: *metatheoretical analysis, homeostatic behavior, spatial and time series of data, Legendre transformation, bundles on manifolds, universal functions, tangent fiber bundle structure.*

Введение. В современной науке допускается широкая трактовка поведения систем взаимосвязанных компонентов (компартментов) во взаимодействии со средой. Термин «поведение» употребляется применительно к объектам разного уровня организации. Прежде всего, поведение – совокупность реальных действий и внешних проявлений жизнедеятельности организмов, что имеет большое значение при их адаптации к окружающей среде [24]. Этология - наука об инстинктивном поведении человека и животных в естественной и искусственной среде и эволюции поведения. Специально исследуются поведение электронов в атоме, автомобилей на трассе, толпы людей, товарного рынка и т.д.

В медицине одной из базовых концепций является детерминационная теория [12]. Ее задача - свести в единую науку все основные современные знания, накопленные в области медико-биологических исследований, объединить представления о гомеостатическом, эволюционном, экологическом, адаптивном, психосоматическом регулировании поведения с описанием процессов сохранения здоровья или развития болезни. Адаптивное гомеостатическое реагирование как специфическое для организмов явление определено в качестве базового положения этой концепции.

Распространенной формой поведенческой реакции является гомеостаз организмов и связанное с ним гомеостатическое (ГС) поведение. Гомеостаз - это механизм саморегуляции, который определяет способность открытой системы сохранять постоянство своего внутреннего состояния путем скоординированных реакций, направленных на поддержание динамического равновесия, что выражено в стремлении системы воспроизводить себя, восстанавливать утраченное равновесие, преодолевать сопротивление внешней среды для существования – жизни организма [15, 25].

Центральная идея поведенческого гомеостаза (behavioral homeostasis) заключается в том, что сначала эволюционно совершенствовалась физиологическая регуляция организмов с последующим переносом явления гомеостаза в сферу поведения и психологии, социально-экономического развития [29]. Животные приспосабливаются к изменчивой внешней среде и к изменяющимся внутренним потребностям не только за счет физиологических реакций, но и путем активного поведения во внешнем окружении, например, выбор пищи - это поиск в окружающей среде веществ, которые обеспечивают ГС-полезность для внутренней среды в природных ландшафтах в виде жизненно важных первичных (питательных) и вторичных (фармацевтических) соединений для поддержания длительное время на постоянном уровне численности популяции [31]. Поведение, защищающее здоровье, можно рассматривать как процесс изменений с последовательностью разных стадий [27].

Впервые проблема неопределенности в организации и стадийной динамике поведения ГС-систем обсуждалась в работах Н. А. Бернштейна [8]. Его гипотеза о «повторении без повторения» в биомеханике в обобщенном виде сформулирована как «эффект Еськова – Зинченко», согласно которому ГС-системы имеют статистическую неустойчивость, когда подряд получаемые выборки данных измерений в последовательности стадий процесса являются уникальными [4]. Возникает новое понимание гомеостаза и эволюции ГС-систем в фазовом пространстве состояний: сложные системы демонстрируют непрерывное движение вектора состояния в этом пространстве, где хаотически изменяются все статистические характеристики выборок [21]. Постепенно проблема ГС-регулирования становится базовой не только для биологии и медицины, но и науки в целом в рамках новой третьей парадигмы естествознания [4]. Установлено, что стационарные режимы отсутствуют не только у биологических, психологических, медицинских систем, но и у метеорологических параметров среды обитания, что оказывают непосредственное влияние на регуляторные функции систем [14].

В этой статье исследуются метатеоретические (МТ) особенности моделирования ГС-поведения систем разного типа, основанные на математических методах касательного расслоения дифференциальной геометрии и статистической обработки пространственно-временных рядов данных с целью объяснения эффектов трансформации функций связи их фазовых характеристик.

Основные понятия и модели. ГС-поведение характеризуется стремлением к равновесию, поиском лучшего варианта приспособления к среде, нестабильностью и непредсказуемостью. Гомеостаз обеспечивается механизмом отрицательной и положительной обратной связи, который состоит из сенсора, регулятора и эффектора. Они являются основными компонентами каждого ГС-отклика. Сенсор (рецептор) обнаруживает изменения во внутренней или внешней среде. Регулятор (центр управления, контроля) по информации от сенсоров инициирует ответ для поддержания гомеостаза. Механизм отрицательной обратной связи устраняет отклонение от равновесных значений состояния системы - нормального диапазона, который является оптимальным, в частности, для подержания здоровья и физиологической стабильности организма. Для приведения системы в движение, внешний стимул должен вывести физиологический параметр за пределы его нормального диапазона.

Механизм положительной обратной связи в ГС-реакциях усиливает процесс, чтобы создать еще более сильный отклик на действие стимула для выталкивания состояния системы из нормального диапазона. Наглядный пример – неограниченное увеличение численности популяции $N(t)$ согласно мальтузианской модели $dN/dt=\alpha N$ экспоненциального роста $N(t)=N_0\exp(\alpha t)$ при избытке ресурсов жизнеобеспечения (N_0 – начальная численность, $\alpha>0$ – относительная скорость роста популяции, разность коэффициентов рождаемости и смертности). При ограниченности ресурсов рост замедляется, и численность стабилизируется по кривой логистической функции П.Ферхюльста [5, 30], которая учитывает особенности гомеостатического регулирования: $dN/dt=\alpha N-\beta N^2$, где β – коэффициент внутрипопуляционной конкуренции; $K = \alpha/\beta$ – поддерживающая ёмкость среды (максимальная численность популяции $N(\infty)=K$), величина которой зависит от многих факторов случайного, непредсказуемого характера. Логистическую кривую $N(t)$ по частям (стадиям) можно приблизить экспоненциальными функциями с разными $\alpha(t)$, причем при малых значениях $N(t)$ имеет место полное совпадение. В средней части при малых α кривая близка к линейной зависимости, а на завершающей стадии роста при $\alpha=0$ функция Ферхюльста выходит на плато $N=K$.

В развитии теоретического знания роль регулятора начинают играть философско-методологические принципы [9], выполняющие функции интегрирующего центра x_0, что задает конкретную установку a, в соответствие с которой складываются и развиваются понятия x и законы $F(x)$ специальных теорий. В первую очередь, это универсальные законы диалектики о связях действительности, что проявляются как в сфере материального, так и идеального, в частности, мышления, и выступают в качестве всеобщих регулятивов познания. Фундаментальный характер науке о ГС-поведении придаёт также разумное использование математических моделей и методов, вытекающих из формул математики, на действие которых аксиоматически вводятся ограничения, придающие им содержательный смысл на МТ-уровне обобщения научной информации, где формируются знания, общие для различных системных теорий [22].

Системная функция $F(x)$ каждой теории зависит от набора (вектора, картежа) наблюдаемых переменных $x(\xi,t)=\{x_i(\xi,t)\}$, параметризованных в физическом пространстве ξ и времени t. Здесь i - номер диагностического признака (параметра организма). Вид функции определяется особенностями постановки задачи и набором переменных $x=\{x_i\}$, используемых для ее решения. В теории механизмов ГС-регулирования набор величин $x(\xi,t)$ включает внутренние и внешние характеристики систем, а еще скорости ($x'(t)=dx/dt$) и ускорения ($x''(t)=d^2x/dt^2$) их изменения, а также изменения разного порядка по пространственному параметру ($dx/d\xi$ - градиент, $d^2x/d\xi^2$ - кривизна). Система координат $x=\{x_i\}$ называется фазовым пространством, $x(\xi,t)$ - фазовыми переменными. Траектория точки, изображающей совместное изменение $x(\xi,t)$ называется фазовой кривой, а скорости и ускорения ее перемещения - фазовыми скоростями и ускорениями, формирующими векторные поля фазового пространства движения вдоль фазовых кривых. В моделях других теорий независимые переменные $x(\xi,t)$ имеют иной смысл.

Математические модели и методы широко используются при разработке автоматических систем управления. Особо выделяется робастное управление, цель которого – синтез регулятора, обеспечивающего хорошее качество устойчивости поведения системы, состояние которой отличается от расчётного или его математическая модель $F(x)$ неизвестна. Изменение $F(x)$, вызванное вариациями a её параметров x, называется чувствительностью системы. Системы, что сохраняют необходимый запас устойчивости при всех возможных вариациях параметров, называются робастными. Обычно робастные контроллеры-регуляторы применяются для управления $u(t)$ объектами с неопределённостью [18]. Предлагаются также методы построения идентифицируемых моделей аффинных систем на основе современных представлений нелинейной динамики с выделением по экспериментальным данным инвариантных характеристик, с реконструкцией аттракторов по временным рядам, с поиском симметрий в фазовых траекториях, проведением параметрической идентификации [16]. Процессы нелинейной динамики описываются вектор-функциями касательного пространства с учетом вектора управления $u=\{u_i\}$ из множества допустимых управлений.

Особенностью устойчивого ГС-поведения является изменчивость параметров состояния системы в притягивающей окрестности (квазиаттракторе) инвариантных состояний и траекторий (аттракторов). Аттрактор - компактное подмножество фазового пространства динамической системы, все траектории которой стремятся к этому инвариантному подмножеству, например, к неподвижной точке-центру $x_0=\{x_{0i}\}$. Квазиаттрактор (КА) – область фазового пространства, внутри которой наблюдается непрерывное хаотическое движение параметров вектора $x(t)$, который описывает состояния любой функциональной системы [1]. В модели Ферхюльста численность популяции $N(t)$ возвращается в равновесное $N=K$ из любого начального состояния $N_0\neq 0$, что характеризует ее устойчивость. Параметры многих систем периодически, во многом хаотически, удерживаются вокруг фазовой точки (центра) ГС-состояния в пределах КА. Типичным примером фазового портрета связи переменных x и dx/dt считаются колебания физиологических параметров организма, в котором наблюдается хаотический «калейдоскоп» статистических функций для одного гомеостаза $x(t)$ (объекта), что обосновывает существование эффекта Еськова-Зинченко [6].

Эффект Еськова-Зинченко состоит в отсутствии статистической устойчивости центральных параметров ГС-процессов, строгих причинно-следственных связей в системах – нет статистических совпадений в последовательности выборок данных, что фиксируются в матрице парных сравнений выборок $x_1(t)$ и $x_2(t)$ по непараметрическому статистическому критерию Вилкоксона [8]. Этот критерий используется для проверки различий между двумя выборками парных или независимых измерений признака $x(t)$ в непрерывных или порядковых шкалах. Сопоставляются величины выраженности количественных сдвигов $x_1(t) \to x_2(t)$ в том или ином направлении. Все абсолютные величины сдвигов ранжируются, а ранги суммируются. Гомеостаз сохраняется, если объём КА не меняется или положение центра $x_0=\{x_{0i}\}$ нового КА не выходят за пределы исходного КА. В противном случае имеет место эволюция гомеостаза [6].

Модель поведения отдельного функционального кластера имеет векторно-матричную форму [7]:

$$\frac{dx}{dt} = Ax - b \cdot x + c \cdot u\,, \qquad (1)$$

где $x(t)=\{x_i(t)\}$ - радиус-вектор показателей активности компартментов; $b=\{b_i\}$ – коэффициенты их диссипации (затухания); $u(t)=\{u_i(t)\}$ - параметры внешнего управления показателями с поправочными коэффициентами $c=\{c_i\}$; $A=\{a_{ji}\}$ - матрица коэффициентов передачи возбуждения и торможения между показателями j и i

компартментов; $b \cdot x$, $c \cdot u$ - скалярные произведения векторов.

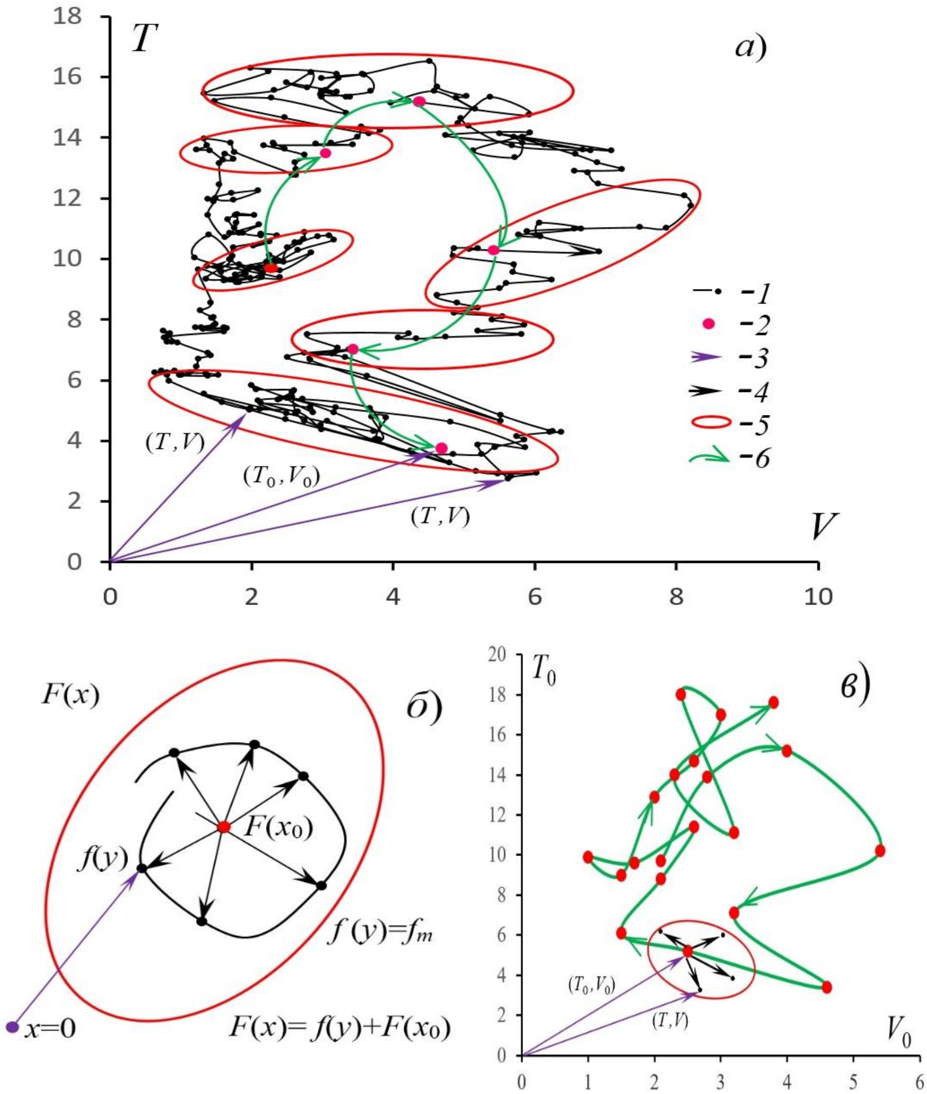

*Рис.*1. Совместное изменения приземной температуры T (°C) и скорости ветра V (м/сек): *а*) фазовая картина формирования временных рядов зависимости температуры от скорости ветра с выделением однородных стадий изменения; *б*) векторно-графическая схема структуры слоя (стадии) $f(y)$ расслоения фазового пространства x на многообразии $F(x)= T(V)$ в точке касания $x_0 = V_0$ – центров локальных координат $y(t)=x(t)-x_0$ ($x=V$, $F(x)=T(V)$; *в*) многообразие последовательностей центров стадий (слоев) изменения зависимости $F(x_0) = T_0(V_0)$. *Условные обозначения*: *1* - значения и линии связи исходных данных $T(V)$; *2* - положение центров (инвариантов) слоя x_0 (аттракторов); *3* - радиусы-векторы исходной зависимости $F(x)= T(V)$; *4* - радиус-векторы локальной зависимости $f(y)$ в относительных переменных (T-T_0) и (V-V_0); *5* - границы ядра слоя - квазиаттрактора; *6* - направления трансформации центров слоев (стадий). *Источник информации*: данные метеонаблюдений за июнь 2009 г. с временным шагом 8 минут на станции Монды [17].

Подобная модель (1) похожа на уравнения, что применяются в теории автоматического управления [20] и при анализе временных рядов данных и построении прогнозов в экономике. Основным недостатком таких общих моделей является большое число коэффициентов и параметров системы и его среды, которые необходимо статистически определять. Внешнее управление $u(t)$, в частности, можно трактовать как влияние климата в долгосрочном аспекте и метеопараметров в краткосрочном на функции организма человека [3]. Динамика метеорологических факторов также может исследоваться с позиций математической статистики рядов фазовых состояний.

Здесь для анализа временных рядов используются данные серии метеонаблюдений 1999-2012 гг. на станции Монды Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН, расположенной в приграничной зоне с Монголией в горах Восточного Саяна (51.6 º с.ш., 101 º в.д.) на высоте 2010 м над уровнем моря. На станции ведутся автоматические измерения с фиксацией на компьютере концентраций озона и угарного газа, проводятся замеры атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра [17]. На основе временных рядов данных микроклиматических наблюдений (рис.1а) теоретически обосновывается и статистически проверяется гипотеза функционального подобия характеристик стадий природных процессов и их трансформации при изменении фоновых условий среды, что позволяет методом скользящей регрессии выявить устойчивые показатели состояния среды и моменты их дискретной трансформации [23].

Изменение фоновых условий рассматривается как сдвиг значений признаков $x_1(t) \rightarrow x_2(t)$, при котором сохраняется закон (вид уравнения) формирования потоковых и диффузионных процессов, т.е. закон инвариантен относительно преобразования среды, когда общим решением уравнения становится разность состояния системы и среды:

$$f(y)=F(x)-F(x_0),\ y(t)= x(t)-x_0(t). \qquad (1)$$

Это уравнение также инвариантно (симметрично) относительно аффинного преобразования (поворота) $f_k(y)=a_k f(y)$, позволяющего свести разнотипные функции $f_k(y)$ к одной $f(y)$ и вывести из последней остальные зависимости [23]. Функции $f_k(y)$ многих переменных при разных a_k соответствуют пучку линий или векторов, концы которых в фазовом пространстве вырисовывают траекторию состояния системы - годограф (рис.1б).

Метатеоретический подход. В иерархической организации научной информации выделяется уровень метатеоретических (МТ) знаний, объединяющий средства математического, методологического и статистического анализа на основе формул прикладной математики [22]. В математике всякая системная функция $F(x)$ (гладкая, дифференцируемая, аналитическая) может быть переведена $F(x) \rightarrow F^*(a)$ в функцию $F^*(a)$ двойственных переменных $a=\{a_i\}$ с помощью касательного преобразования Лежандра:

$$F(x) = a\cdot x + F^*(a) = \sum_i a_i x_i + F^*(a),\ a_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial y_i} \qquad (2)$$

Переменные a_i называются показателями чувствительности изменения функции $F(x)$ к изменению наблюдаемых величин x_i на единицу. Аналогично $-x_i$ являются чувствительностью изменения функции Лежандра $F^*(a)$ к единичному изменению a_i. Здесь $a=\{a_j\}$ - набор (вектор) двойственных к вектору $x=\{x_j\}$ переменных; $a\cdot x$ - скалярное произведение векторов a и x.

Согласно соотношению (2) коэффициенты чувствительности $a=\{a_i\}$ могут быть рассчитаны по статистической зависимости $F(x)$ методом множественной регрессии, где величина $F^*(a)$ вычисляется как свободный член (отрезок) линейного уравнения $F^*(a)=F(x)$. Разные статистические ряды $F(x)$ имеют отличающийся набор коэффициентов $a=\{a_i\}$ и $F^*(a)$; вид функции $F^*(a)$ восстанавливается по множеству этих данных для одного или разных объектов исследования в однотипной среде. Достоверное изменение вида этой функции указывает на отличие состояний системы (см. рис.1а). Однородность выборок при разных значениях $a=\{a_i\}$ наблюдается при пересечении на графике линий зависимостей (2) в одной точке $x_0 = \{x_{0i}\}$ (см. рис.1б):

$$F(x_0) = a\cdot x_0 + F^*(a) = \sum_i a_i x_{0i} + F^*(a). \qquad (3)$$

Тогда линии связи образуют пучок зависимостей:

$$f(y) = F(x) - F(x_0) = a \cdot (x_i - x_{0i}) = \sum_i a_i y_i \quad (4)$$

В медицине относительным переменным y и функциям $f(y)$ хорошо соответствуют понятия «симптом» и «синдром». Параметры точки касания $x_0(t)$ зависят от величины неучтенных факторов и влияния средового фона, что определяет уникальность слоя. Линии $f(y)$ пучка x_0 аффинно подобны (симметричны) как внутри слоя, так и при межстадийном сравнении.

Билинейная функция $f(a,y)$, заданная в локальных координатах $y = \{y_i\}$, в каждом слое вычерчивает зависимость от нескольких относительных переменных $y_i = x_i - x_{0i}$ (рис.1б). В точке касания x_0 (начале координат y) векторная величина y=0, и неизвестная функция $F(x)$ точно совпадает с ее значением в слое $F(x) = F(x_0)$. В том случае, если значения искомой функции $F(x)$ и значения ее представления в касательном слое $F(x) = f(y)+F(x_0)$ совпадают при разных отклонениях y и $f(y)$, непрерывная функция $F(x)$ и ее дискретный аналог $F(x_0)$ становятся многообразиями. Это замечание выражает метатеоретический принцип, согласно которому системные связи реальности $F(x)$ являются многообразиями, познаваемые по частям $F(x) = f(y)+F(x_0)$ в разных условиях среды x_0 по единым законам $f(y)$. Величина $x_0(t)$ в каждом слое индивидуальна и дискретно переходит из состояния в состояние (рис.1в), выявляя структуру $F(x_0)$, в общих чертах повторяющую системную функцию $F(x)$, которую таким образом можно приблизительно восстановить.

В медицине многообразием является функция здоровья $F(x)$, где нормальные физиологические состояния $F(x_0)$ и патологические новообразования $f(y)$ подчиняются общим законам (уравнениям) формирования касательных (гипер)плоскостей. Давно считается [2], что в основе нормальных $F(x_0)$ и патологических $f(y)$ явлений лежит один общий биологический процесс $F(x)$. Приспособительные процессы, что обеспечивают гомеостаз в больном организме – это не особые реакции организма, а разнообразные комбинации его физиологических функций $f(y)$, развертывающихся на той же, что и в норме $F(x_0)$, материальной основе $F(x)$ [19]. Механизм ГС-регулирования состоит из сенсора $F(x_0)$ на входе, регулятора $f(y)=a{\cdot}y$ и эффектора $F(x)=F(x_0)+f(y)$ на выходе ГС-системы.

В структуре временного ряда (см. рис.1а) выделяются группы точек, образующие касательные слои (стадии процесса). В составе слоя в точке касания x_0 выделяется центр $F(x_0)$, вокруг которого по формуле $f(y)=a{\cdot}y$ варьируют значения состояния системы $F(x)$ в слое $F(x_0)$. Линии фазовых кривых в слое вычерчиваются концом вектора $f(y)$, начало которого находится в центре слоя; при изменении координат центра перемещается и опорная точка векторов. Изменение положения x_0 центра притяжения (аттрактора) текущих состояний $F(x)$ трактуется как трансформация (переход из слоя в слой) состояния системы (см. рис.1*в*). Область изменчивости параметров состояний в слое рассматривается как ядро слоя - квазиаттрактор (КА) с границей изменчивости $f(y)=f_m$ – красной линии (см. рис.1). В пределах ядра слоя функция $f(y)$ описывает реальность точно так же, как неизвестная функция $F(x)$. Увеличение расстояния между КА-центрами свидетельствует о повышенной устойчивости системы по стадиям процесса. Возможность одновременного изменения начального и конечного положения векторов $f(y)$ придают фазовой кривой хаотические свойства, однако последовательное использование соотношений (2) и (3) позволяет выделить индивидуальные стадии процессов в рядах данных. Существование фиксированных значений центра $F(x_0)$ и КА-границы f_m и универсального уравнения $f(y)$ описания фазовых кривых рассматривается в качестве аксиом состояния и изменения параметров слоя [22].

При необходимости при расслоении используются квадратичные формы зависимости, которые описывают нелинейные взаимодействия агентов и факторов в фазовом пространстве типа упомянутой логистической функции Ферхюльста гомеостатического регулирования численности популяции ($dN/dt=\alpha N-\beta N^2$) или в базовой математической модели инфекционных заболеваний [13]. Эта особенность используется в модели группового учета аргументов А.Г.Ивахтенко (МГУА) в виде полинома разной степени (опорной функции).

Статистический анализ рядов. Рассмотрим несколько примеров обработки временных и пространственных рядов на предмет выявления локальных КА с использованием свойств билинейных функций $f(y)$.

Микроклиматические измерения. Согласно преобразованию (2), связи любых рядов данных можно исследовать методом скользящей регрессии, например, для парного сравнения температуры и скорости ветра использовать линейное уравнение $T=aV+b(a)$, где a - коэффициент чувствительности; $b(a)$ - статистическая функция преобразования Лежандра. В соответствие с (3), локальные линейные зависимости $T(V)$ образуют пучок линий с центром (T_0,V_0), если для них выполняется соотношение $b(a) = –aV_0+T_0$. При обработке данных (см. рис.1) использовался метод скользящей парной регрессии по 5-ти точкам с определением коэффициентов a и b, значения которых сравнивались $b(a)$, постепенно расширяя выборку данных для получения наибольшего значения коэффициента корреляции R, т.е. формирования достоверно линейной зависимости $b(a)$ (рис.2а). Дальнейшее снижение R указывает на начало перехода из одного однородного по $b(a)$ слоя КА в другой КА. Длина линии $b(a)$ и количество связанных с ней точек (данных) определяет мощность КА. Точки $b(a)$ блуждают вдоль линии $b(a)$, и на основе их последовательности, согласно (1), можно приближенно восстановить исходную зависимость $T(V)$. В однородной по $b(a) = –aV_0+T_0$ выборке расчетных данных регрессионным методом определяются коэффициенты (T_0,V_0), что координируют положение центра КА (аттрактора слоя).

Последовательность смены центров (T_0,V_0) иллюстрирует трансформацию КА в изучаемом процессе примерно с полусуточным шагом (см. рис. 1в). Фазовая траектория $T_0(V_0)$ имеет сложную форму, которую сложно напрямую математически описать, если не применять в наборе фазовых координат производные разного порядка по времени. Статистические исследования показывают, что эволюция центров КА-квазициклов стока рек и урожайности пшеницы удовлетворяет линейной зависимости $x' = \alpha x+\beta,$ что позволяет ставить и решать задачи прогнозирования с учетом климатических трендов [10]. В случае рис.1в работает уравнение $T''=0{,}73T'–0{,}75$ ($R=0{,}66$), где $T'=\Delta T/\Delta t,$ $T''=\Delta^2T/\Delta t^2$ рассчитывается по приращениям ΔT и Δt с временным шагом Δt в половину суток. Эта тема заслуживает в дальнейшем подробного рассмотрения.

При $a=0$ будет $b(0)=T_0$ - точка равновесной температуры воздуха, что лежит на вертикальной оси ординат (см. рис.2). На рис.2а показана ситуация, когда два КА имеют одинаковое положения центра аттрактора по температуре T_0, но разные по скорости ветра V_0. Месячные колебания показателя температурного режима T_0 начала лета в горах Восточного Саяна составляют порядка 20°С. Более точные характеристики строения КА можно получить при многомерном анализе временных рядов.

Восстановительно-возрастная динамика. Гомеостаз понимается в широком смысле как поддержание внутренних физиологических состояний в конкретных условиях окружающей среды. Экологический гомеостаз наблюдается в востановленных климаксовых сообществах в постоянной среде. Существует 6 стадий восстановление гомеостаза сообщества, обусловленные механизмами формирования сукцессий: подготовка пионерными видами внутренних условий для возобновления и роста коренных пород (содействие), толерантность этих пород к недостатку тепла, освещения и других ресурсов и противодействие внедрению прежних и новых видов (ингибирование) [26].

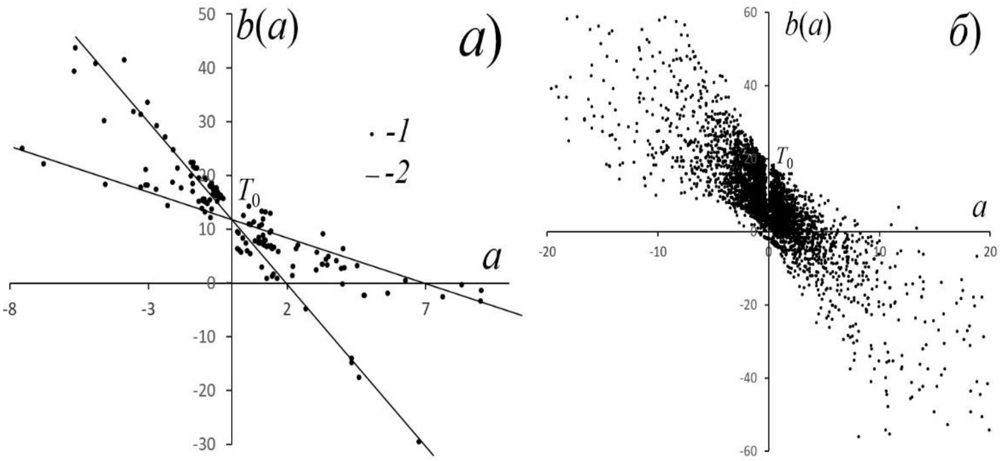

Рис.2. Статистические графики двойственной зависимости $b(a) = -aV_0+T_0$ для *а*) двух соседних стадий КА суточных изменений; *б*) различных микроклиматических стадий КА погоды июня 2009 г. *Условные обозначения*: *1* - значения расчетных данных $b(a)$; *2* - аппроксимирующие линии $b(a)= -aV_0+T_0$.

Механизм взаимодействия запасов биомассы различных пород в лесонасаждении в ходе сукцессионного цикла восстановления лесов разных пород описывается в относительных показателях $y(t) = \{y_i(t)\}$, $y_i(t) = x_i(t)\text{-}x_{0i}(t)$ и скоростях $y'_i(t)$ их изменений в виде однородного уравнения (4) при $f(y)=y'_i(t)$:

$$y'_i(t)=a_{1i}y_1(t)+a_{2i}y_2(t)+\ldots+ a_{ji}y_j(t)+\ldots + a_{ni}y_n(t), \quad (5)$$

где a_{ji} - коэффициент взаимного влияния пород ($j\rightarrow i$); $x_{0i}(t)$ - учитывает средовые условия роста запаса и смены i-й породы.

Для изучения механизмов динамики горной тайги составлялись эскизы таблиц хода роста на основе повыдельных таксационных показателей из базы данных ГИС лесоустройства Слюдянского лесхоза Южного Прибайкалья [11]. С помощью модели проведён количественный анализ взаимодействия древостоев мелколиственных, светлохвойных и темнохвойных пород (рис.3).

По характеру доминирования в разных местоположениях и типах леса выделены три КА - мелколиственная, светлохвойная и темнохвойная стадии восстановления. Коэффициенты взаимодействия a_{ji} меняются по стадиям сукцессии, отражая особенности механизма сукцессионного процесса. Изменение коэффициентов взаимодействия пород для разнотравных лесов синхронизировано во времени, отчётливо прослеживается работа механизмов стабилизации и ингибирования, а в брусничнозеленомошных лесах колебания коэффициентов смещены во времени и изменяются в противофазе. Прослеживается волновая динамика межкомпонентных стабилизирующих отрицательных $a_{ji}<0$ и активизирующих положительных $a_{ji}>0$ обратных связей [11]. Мощность стадийных КА увеличивается с возрастом древостоев, достигая набольшей величины в состоянии ГС-равновесия (климатической нормы) в темнохвойных горно-таежных лесах.

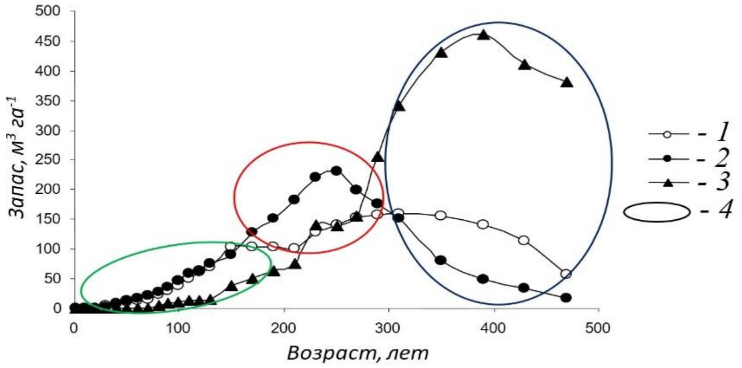

Рис. 3. Изменение с возрастом запасов древостоев горно-таёжных бруснично-зеленомошных лесов III бонитета северовосточного макросклона хр. Хамар-Дабан по трем группам пород: 1 – мелколиственные, 2 – светлохвойные, 3 – темнохвойные; *4* - выделены три соответствующие КА-стадии восстановления.

Ландшафтная неоднородность. По аналогии с временными рядами пространственные ряды исследуются с выделением однородных структур, например, высотно-поясной дифференциации участков ландшафтов. Сложность анализа рядов обусловлена многочисленностью фазовых переменных, что делает необходимым расчет интегральных показателей в форме (4) метрики $f(y)=a\cdot y$ отклонения от нормы $y=\{y_i\}$, $y_i=x_i-x_{0i}$. Для расчета $f(y)$ применялся метод главных компонент (МГК), где первая главная компонента (ГК1) учитывает основную часть изменчивости (вариации) центрированных и нормированных значений $x=\{x_i\}$ типа $y=\{y_i\}$, а остальная вариация распределяется по ГК2 и остальным менее важным компонентам.

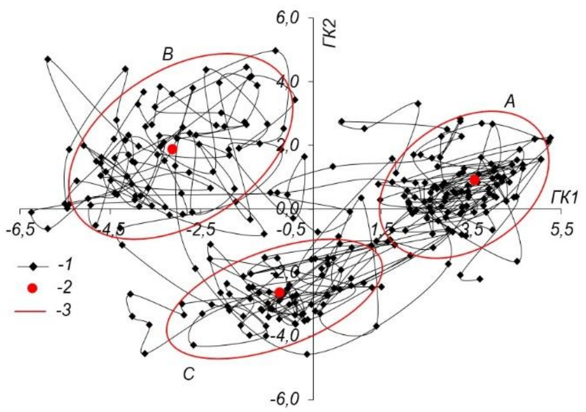

Рис. 4. Организация фазового пространства интегральных характеристик ГК1 и ГК2. *Условные обозначения: 1* - характеристики БГЦ и линии соседства БГЦ вдоль трансекта; *2* - положение центров (инвариантов) слоя x_0 (аттракторов); *3* - границы ядра слоя - квазиаттрактора. *Группы БГЦ*: А – приводораздельная, В – верхнесклоновая, С – нижнесклоновая.

Для иллюстрации в пространстве ГК1 и ГК2 (рис.4) представлены данные изучения биогеоценозов (БГЦ) таежных геосистем на трансекте длиной 3000 м, расположенном в бассейнах рек Каторжанка и Мал. Шумиха на юго-западном побережье оз. Байкал [28]. Расчеты МГК проводились по 48 показателям, из которых оставлены только слабо коррелированные переменные. Наибольшую площадь территории занимает горно-таежный геом темнохвойных лесов ограниченного развития, а также встречаются фации геома лиственничных лесов оптимального развития. На фазовой кривой в пространстве ГК1 и ГК2 выделяются участки БГЦ (КА-фации) приводораздельного (А), верхнесклонового (В) и нижнесклонового (С) положения. Коренные фации ГС-устойчивости формируются на выположенных приводораздельных поверхностях и представлены темнохвойными елово-кедрово-пихтовыми лесами на дерновых лесных суглинистых почвах. На склонах и в заболоченных долинах преобладают фации сублитоморфного факторально-динамического ряда, на характеристики которых еще накладываются факторы увлажнения.

На рис.4 выделяются позиции центров и границ КА-ядра типологического слоя группы и классов фаций, где центры соответствуют точкам касания слоями функции связи характеристик горно-таежного геома $F(x)$ в пространстве ГК1 и ГК2.

Заключение и выводы. Метатеоретический (МТ) уровень познания находится между теоретическим и математическим научным знанием и относится к области прикладной математики – математического, методологического и статистического анализа информации, что в эмпирическом плане представлена пространственными и временными рядами данных, отражающими поведение систем разного рода. Гомеостатическое (ГС) поведение, или поведенческий гомеостаз предполагает существование устойчивых последовательностей данных (серий), связанных с положением центра (аттрактора) изменчивости (квазиаттрактора) в фазовом пространстве, координаты которого представлены значениями наблюдаемых переменных, скоростями и ускорениями их изменения. Для исследования и моделирования траекторий ГС-поведения систем предлагается использовать МТ-идеи и методы дифференциальной геометрии, а именно процедуры расслоения пространства на многообразиях функциональной связи показателей временных процессов и пространственных явлений.

Этот подход применяется для обоснования «эффекта Еськова – Зинченко», по результатам которого ГС-системы образуют последовательность стадий (слоев) с универсальной функцией взаимосвязи показателей и уникальными характеристиками положения центра и ядра ГС-слоя: «повторении без повторения». Хаотическое движение вектора состояний определяется одновременным изменением координат начала и конца векторов, изображающих годограф фазовых траекторий. Такие ГС-закономерности изменчивости характерны для многих биологических, психологических, медицинских, метеорологических и иных систем, что единообразно проявляются в пространственных и временных рядах данных.

Основываясь на МТ-свойствах преобразования Лежандра, по рядам данных статистически выделяется двойственная функция, которая в границах ядра слоя имеет линейный вид, что становится критерием определения положения центра и границ индивидуальных ГС-стадий. Центры лежат на поверхности многообразия системной функции связи переменных, и по их положению появляется возможность судить о структуре этой поверхности и закономерностям ее формирования как зависимости признаков, скоростей и ускорений их варьирования. Продемонстрирована общая схема МТ-обработки временных и пространственных рядов с выделением однородных участков (стадий) ГС-траекторий в фазовом пространстве признаков состояния разнокачественных систем. Возникает проблема понимания, почему ГС-система выходит из равновесного состояния в процессе трансформации и устойчивого развития – проблема, которую предстоит решать МТ-методами.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы АААА-А21-121012190056-4).

Литература

1. Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В., Даянова Д.Д., Берестин Д.К. Параметры квазиаттракторов в оценке стационарных режимов биологических динамических систем с позиций компартментно-кластерного подхода // Вестник новых медицинских технологий, 2014 – Т. 21, № 1 – С.134-137.
2. Давыдовский И.В. Общая патология человека. М.: Медицина, 1969. – 611 с.
3. Дронова Е.В., Митюшкина О.А., Светлова С.Ю. Сложные динамические биомедицинские системы. Возможности их анализа с помощью инструментов теории хаоса и самоорганизации систем // Сложность. Разум. Постнеклассика, 2017. – №4. – С. 112-136.
4. Еськов В.В. Математическое моделирование гомеостаза и эволюции complexity. – Тула: Издательство ТулГУ, 2016. – 372 с.
5. Еськов В.В. Математическое моделирование в прогнозах развития человечества при переходе в постиндустриальное общество // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2017. – №3. – С.90-98.
6. Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Еськов В.В. Эффект Еськова-Зинченко опровергает представления I.R. Prigogine, JA. Wheeler и M. Gell-Mann о детерминированном хаосе биосистем - complexity // Вестник новых медицинских технологий, 2016. – Т. 23. – N 2. – С. 34-43.
7. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А. Особые свойства биосистем и их моделирование // Вестник новых медицинских технологий, 2011. – Т. 18. – №3. – С.331-332.
8. Еськов В.М., Зинченко Ю. П., Филатова О. Е., Еськов В.В. Гипотеза Н.А. Бернштейна и реальный хаос гомеостатических систем в психологии // Вестник московского университета. Серия 14. Психология, 2017. – № 3. – С. 22-38.
9. Карпин В.А. Теоретическая медицина: современные философско-методологические основания и принципы. Вестник СурГУ. Медицина, 2015. – №2 (24). – С. 5-14.
10. Кумратова А.М. Математические методы и инструментальные средства исследования трендов эволюционного развития природных и экономических процессов // Научный журнал Кубанского ГАУ, 2015. – №111(07). – С. 1-15.
11. Лесных С. И., Черкашин А. К. Модельный анализ взаимодействия разных групп пород в процессе сукцессионных изменений горной тайги // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология», 2016. – Т. 15. – №1. - С. 11–24.
12. Лисицын Ю.П., Петленко В.П. Детерминационная теория медицины: доктрина адаптивного реагирования. – Спб.: Гиппократ, 1992. – 414 с.
13. Марчук Г. И. Математические модели в иммунологии. Вычислительные методы и эксперименты. М.: Наука, 1991. – 304 с.
14. Мирошниченко И.В., Баженова А.Е., Белощенко Д.В., Потетюрина Е.С. Эффект Еськова-Зинченко в условиях локального холодового воздействия // Сложность. Разум. Постнеклассика, 2017. – №2. – С.13-17. - DOI: 10.12737/article_594cefab2491d6.09106106
15. Наточин Ю.В., Ирхин Ю.В. Гомеостаз // Большая российская энциклопедия, в 35 т. / гл. ред. Ю.С.Осипов. – М.: Большая российская энциклопедия, 2004–2017.
16. Никульчев Е.В. Идентификация динамических систем на основе симметрий реконструированных аттракторов. – М.: МГУП, 2010. – 100 с.
17. Потемкин В. Л., Шультайс Э. В. Сезонная динамика концентрации приземного озона над Восточным Саяном // Оптика атмосферы и океана, 2004. – Т. 17(4). – С. 317–321.
18. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. – М.: ЗАО "Издательский дом МЭИ", 2008. – 129 с.

19. Саркисов Д.С., Пальцев М.А., Хитров Н.К. Общая патология человека. – М.: Медицина, 1997. – 608 с.
20. Справочник по теории автоматического управления // под ред. Красовского А.А. – М.: Наука, 1987. – 711 с.
21. Стёпин В.С., Еськов В.М., Буданов В.Г. Новые представления о гомеостазе и эволюции // Сложность. Разум. Постнеклассика, 2016. – № 3. – С. 52-58.
22. Черкашин А.К. Метатеоретическая медицина: математический, методологический и статистический анализ // Сложность. Разум. Постнеклассика, 2022. – №3. – С. 63-86. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-51-59.
23. Черкашин А.К., Бибаева А.Ю. Симметрия и трансформация микроклиматических процессов // Метеорология и гидрология, 2014. – №3. – С. 27-36.
24. Юдин Э.Г. Поведение // Новая философская энциклопедия [Электронный ресурс], URL: https://gufo.me/dict/philosophy_encyclopedia/ (дата обращения: 15.06.2022).
25. Cannon W. The Wisdom of the Body. – London: Kegan Paul and Co., Ltd., 1932. – 312 p.
26. Clements F. Plant succession: an analysis of the development of vegetation. – Washington : Carnegie Institution of Washington, 1916. – 512 p.
27. DiClemente C.C., Delahanty J. Homeostasis and change: A commentary on Homeostatic theory of obesity by David Marks // Health psychology open, 2016. – Vol. 3. – No. 1. – DOI: 10.1177/2055102916634366.
28. Frolof A. A., Cherkashin A. K. Altitudinal gradient as a complex factor for formation of landscape microzonality and geosystem serialness // Geography and Natural Resources, 2012. – Vol. 33. – No. 1. – P. 10 – 18.
29. Schulkin J. Curt Richter: a life in the laboratory. – Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2005. – 208 p.
30. Turchin P. Complex population dynamics: a theoretical/empirical synthesis. – Princeton and Oxford: Princeton university press, 2013. – 451 p.
31. Villalba J.J., Provenza F.D. Self-medication and homeostatic behaviour in herbivores: learning about the benefits of nature’s pharmacy // Animal, 2007. – Vol. 1. – No. 9. – P. 1360 - 1370.

References

1. Gavrilenko T.V., Vohmina Yu.V., Dayanova D.D., Berestin D.K. Parametry kvaziattraktorov v ocenke stacionarnyh rezhimov biologicheskih dinamicheskih sistem s pozicij kompartmentno-klasternogo podhoda [Parameters of quasiatractors in the assessment of stationary modes of biological dynamic systems from the perspective of the compartmental-cluster approach] // Vestnik novyh medicinskih tekhnologij [Bulletin of New Medical Technologies], 2014. – Vol. 21, No. 1. – P.134-137. (In Russian).
2. Davydovskij I.V. Obshchaya patologiya cheloveka [General human pathology]. – Moscow: Medicina, 1969. – 611 p. (In Russian).
3. Dronova E.V., Mityushkina O.A., Svetlova S.YU. Slozhnye dinamicheskie biomedicinskie sistemy. Vozmozhnosti ih analiza s pomoshch'yu instrumentov teorii haosa i samoorganizacii system [Complex dynamic biomedical systems. Possibilities of their analysis by means of instruments of chaos theory and self-organization of systems] // Slozhnost'. Razum. Postneklassika [Complexity. Reason. Post-Neoclassics], 2017. – No. 4. – P. 112-136. (In Russian).
4. Es'kov V.V. Matematicheskoe modelirovanie gomeostaza i evolyucii complexity [Mathematical modeling of homeostasis and evolution]. – Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2016. – 372 p. (In Russian).
5. Es'kov V.V. Matematicheskoe modelirovanie v prognozah razvitiya chelovechestva pri perekhode v postindustrial'noe obshchestvo [Mathematical modeling in forecasts of human development in the transition to a post-industrial society] // Slozhnost'. Razum. Postneklassika [Complexity.

Reason. Post-Neoclassics]. – 2017. – No.3. – P. 90-98. (In Russian).

6. Es'kov V.M., Zinchenko Yu.P., Filatov M.A., Es'kov V.V. Effekt Es'kova-Zinchenko oprovergaet predstavleniya I.R. Prigogine, JA. Wheeler i M. Gell-Mann o determinirovannom haose biosistem - complexity [The Yeskov-Zinchenko effect refutes the ideas of I.R. Prigogine, JA. Wheeler and M. Gell-Mann about the deterministic chaos of biosystems - complexity] // Vestnik novyh medicinskih tekhnologij [Bulletin of New Medical Technologies], 2016. – Vol. 23. – No. 2. – P. 34-43. (In Russian).
7. Es'kov V.M., Es'kov V.V., Filatova O.E., Hadarcev A.A. Osobye svojstva biosistem i ih modelirovanie [Special properties of biosystems and their modeling] // Vestnik novyh medicinskih tekhnologij [Bulletin of New Medical Technologies], 2011. – Vol. 18. – No. 3. – P. 331-332. (In Russian).
8. Es'kov V.M., Zinchenko YU. P., Filatova O. E., Es'kov V.V. Gipoteza N.A. Bernshtejna i real'nyj haos gomeostaticheskih sistem v psihologii [Bernstein's Hypothesis and the Real Chaos of Homeostatic Systems in Psychology] // Vestnik moskovskogo universiteta. Ser. 14. Psihologiya [Bulletin of the Moscow University. Series 14. Psychology], 2017. – No. 3. – P. 22-38. (In Russian).
9. Karpin V.A. Teoreticheskaya medicina: sovremennye filosofsko-metodologicheskie osnovaniya i principy [Theoretical Medicine: Modern Philosophical and Methodological Foundations and Principles] // Vestnik SurGU. Medicina [SurSU Bulletin. Medicine], 2015. – No. 2 (24). – P. 5-14. (In Russian).
10. Kumratova A.M. Matematicheskie metody i instrumental'nye sredstva issledovaniya trendov evolyucionnogo razvitiya prirodnyh i ekonomicheskih processov [Mathematical methods and tools for studying trends in the evolutionary development of natural and economic processes] // Nauchnyj zhurnal Kubanskogo GAU [Scientific Journal of the Kuban GAU], 2015. – No. 111(07). – P. 1-15. (In Russian).
11. Lesnyh S. I., Cherkashin A. K. Model'nyj analiz vzaimodejstviya raznyh grupp porod v processe sukcessionnyh izmenenij gornoj tajgi [Model analysis of the interaction of different species groups during successional changes in mountain taiga] // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya» [Proceedings of the Irkutsk State University. Biology. Ecology], 2016. – Vol. 15. – No. 1. – P. 11–24. (In Russian).
12. Lisicyn Yu.P., Petlenko V.P. Determinacionnaya teoriya mediciny: doktrina adaptivnogo reagirovaniya [Deterministic Theory of Medicine: The Adaptive Response Doctrine]. – Spb.: Gippokrat, 1992. – 414 p. (In Russian).
13. Marchuk G. I. Matematicheskie modeli v immunologii. Vychislitel'nye metody i eksperimenty [Mathematical models in immunology. Computational methods and experiments]. – Moscow: Nauka, 1991. – 304 p. (In Russian).
14. Miroshnichenko I.V., Bazhenova A.E., Beloshchenko D.V., Potetyurina E.S. Effekt Es'kova-Zinchenko v usloviyah lokal'nogo holodovogo vozdejstviya [The Yeskov-Zinchenko effect under local cold exposure] // Slozhnost'. Razum. Postneklassika [Complexity. Reason. Post-Neoclassics], 2017. – No. 2. – P.13-17. – DOI: 10.12737/article_594cefab2491d6.09106106. (In Russian).
15. Natochin Yu.V., Irhin Yu.V. Gomeostaz [Homeostasis] // Bol'shaya rossijskaya enciklopediya, [The Great Russian Encyclopedia], 35 V. / ed. Yu. S. Osipov. – Moscow: Bol'shaya rossijskaya enciklopediya [The Great Russian Encyclopedia], 2004–2017. (In Russian).
16. Nikul'chev E.V. Identifikaciya dinamicheskih sistem na osnove simmetrij rekonstruirovannyh attraktorov [Identification of dynamical systems based on the symmetries of reconstructed attractors]. – Moscow: MGUP, 2010. – 100 p. (In Russian).
17. Potemkin V. L., Shul'tajs E. V. Sezonnaya dinamika koncentracii prizemnogo ozona nad Vostochnym Sayanom [Seasonal dynamics of ground-level ozone concentration over the Eastern Sayan] // Optika atmosfery i okeana [Atmospheric

and Oceanic Optics], 2004. – Vol. 17(4). – P. 317–321. (In Russian).

18. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. – Moscow: ZAO "Izdatel'skij dom MEI", 2008. – 129 p. (In Russian).
19. Sarkisov D.S., Pal'cev M.A., Hitrov N.K. Obshchaya patologiya cheloveka [General human pathology]. – Moscow: Medicina, 1997. – 608 p. (In Russian).
20. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya [Handbook on automatic control theory] // ed. Krasovsky A.A. – Moscow: Nauka, 1987. – 711 p. (In Russian).
21. Styopin V.S., Es'kov V.M., Budanov V.G. Novye predstavleniya o gomeostaze i evolyucii [New ideas about homeostasis and evolution] // Slozhnost'. Razum. Postneklassika [Complexity. Reason. Post-Neoclassics], 2016. – No. 3. – P. 52-58. (In Russian).
22. Cherkashin A.K. Metateoreticheskaya medicina: matematicheskij, metodologicheskij i statisticheskij analiz [Symmetry and transformation of microclimatic processes] // Slozhnost'. Razum. Postneklassika [Complexity. Reason. Post-Neoclassics], 2022. – №3. – P. 63-86. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-51-59. (In Russian).
23. Cherkashin A.K., Bibaeva A.YU. Simmetriya i transformaciya mikroklimaticheskih processov [Symmetry and transformation of microclimatic processes] // Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology], 2014. – No. 3. – P. 27-36.
24. Yudin E.G. Povedenie [Behavior] // Novaya filosofskaya enciklopediya (Elektronnyj resurs) [New Philosophical Encyclopedia]. Available at: https://gufo.me/dict/philosophy_encyclopedia/. (In Russian).
25. Cannon W. The Wisdom of the Body. – London: Kegan Paul and Co., Ltd., 1932. – P. 312.
26. Clements F. Plant succession: an analysis of the development of vegetation. – Washington: Carnegie Institution of Washington, 1916. – 512 p.
27. DiClemente C.C., Delahanty J. Homeostasis and change: A commentary on Homeostatic theory of obesity by David Marks // Health psychology open, 2016. – Vol. 3. – No. 1. – DOI: 10.1177/2055102916634366.
28. Frolof A. A., Cherkashin A. K. Altitudinal gradient as a complex factor for formation of landscape microzonality and geosystem serialness // Geography and Natural Resources, 2012. – Vol. 33. – No. 1. – P. 10 – 18.
29. Schulkin J. Curt Richter: a life in the laboratory. – Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2005. – 208 p.
30. Turchin P. Complex population dynamics: a theoretical/empirical synthesis. Princeton and Oxford: Princeton university press, 2013. – 451 p.
31. Villalba J.J., Provenza F.D. Self-medication and homeostatic behaviour in herbivores: learning about the benefits of nature's pharmacy // Animal, 2007. – Vol. 1. – No. 9. – P. 1360 - 1370.