

УДК 378:004

DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-524-534

О возможности визуализации процессов подготовки катастрофических событий

Л. П. Коган^{1,2}, А. Е. Вольвач²

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,

Нижний Новгород, Россия

²Отдел радиоастрономии и геодинамики,

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Кацивели, Крым, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются изменения свойств статистики измерений физических и биологических процессов, возникающие в сложных системах перед их явлениями катастрофического типа. К изучаемым феноменам, рассматриваемым в рамках модификаций единого математического алгоритма, относятся вспышки на Солнце, сильные землетрясения и заболевания организма человека. Полученные результаты позволяют визуализировать предвестники катастрофических (или существенно негативных) событий для объектов самой разной природы.

Ключевые слова: прогноз катастроф, вспышки на Солнце, сильные землетрясения, опасные заболевания.

On the possibility of visualizing the processes of preparing catastrophic events

Lev Kogan^{1,2}, Alexandr Volvach²

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

²Radio Astronomy and Geodynamics Department of Crimean Astrophysical Observatory, Katsiveli, RT-22 Crimea

Abstract. The article examines changes in the statistical properties of physical and biological measurements that arise in complex systems prior to catastrophic events. The phenomena studied - solar flares, major earthquakes, and human diseases - are analyzed within the framework of modifications to a unified mathematical algorithm. The results obtained make it possible to visualize precursors of catastrophic (or significantly adverse) events across a wide range of systems of different nature.

Keywords: disaster forecast, solar flares, strong earthquakes, dangerous diseases.

Введение

Одной из наиболее существенных проблем, стоящих перед человечеством, следует считать поиск способов прогнозирования и предупреждения разномасштабных катастроф и неблагоприятных событий, связанных с различными природными и биологическими феноменами. Ее решение рассматривается как важнейший элемент при обеспечении безопасности, защиты инфраструктуры и здоровья населения. Вспышки на Солнце, такие как солнечные штормы и корональные выбросы, являются одними из самых опасных космических явлений [1-4]. Они способны не только вызывать сбои в работе спутников, электросетей, систем связи и навигации, но и приводить к массовому ухудшению состояния здоровья. Их своевременное предсказание должно позволить свести к минимуму негативные последствия для современных технологий и инфраструктуры, равно как и обеспечить подготовленность к вероятным аварийным ситуациям. Вместе с тем на сегодня не существует вполне надежных методик прогнозирования данных природных феноменов.

Сильные землетрясения — это одни из наиболее разрушительных природных катастроф, которые могут привести к гибели очень большого числа людей, обрушению зданий и уничтожению инфраструктуры, а также вызвать возникновение цунами и оползней. При этом основной проблемой надежного прогнозирования сейсмических событий высокой магнитуды является отсутствие повторяемости тех нескольких сотен феноменов (усиление концентрации радона, возникновение линейных облачных структур, изменение поведения животных и т.д.), которые предшествуют таким природным катастрофам [5-9].

В области медицины и здравоохранения очевидны важность прогнозирования заболеваний человека, таких как обострение хронических состояний, эпидемии инфекционных болезней или развитие новых заболеваний. Использование информационных технологий позволяет выявлять риски и предсказывать предстоящее течение заболеваний. Это значительно повышает шансы на выздоровление и повышает эффективность работы системы здравоохранения [10, 11].

Постановка задачи

В этой статье рассматривается возможность описания процессов подготовки приближающихся катастрофических событий самого разного вида. В частности, сюда следует отнести события астрофизической (сильные вспышки на Солнце и связанные с ними магнитные бури) [12–13], геофизической (землетрясения) [14–15] и медицинской [16–18] природы. При этом ставится задача создания единого подхода, в рамках которого становится возможным сформулировать общий инженерно-геометрический язык для исследования предкатастрофических изменений состояния систем самого разного типа. Соответствующий математический аппарат основан на доказанном, в частности в [12–18], феномене одинаковых законов изменения свойств статистики физических и биофизических процессов, связанных с функционированием соответствующих объектов, в период подготовки их предстоящего катастрофического преобразования.

Теория

Далее будем считать, что любые измеряемые величины $x(t)$, связанные с деятельностью изучаемого объекта физической или биологической природы, могут быть представлены в виде следующей суммы:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t). \quad (1)$$

В формуле (1) случайная величина (СВ) $x_1(t)$ – фоновый шум, то есть совокупность обычно наблюдаемых случайных процессов, создаваемых как исследуемой системой, так и возможным шумом самой измерительной аппаратуры. Тогда как случайное слагаемое $x_2(t)$ полагаем вызванным явлениями подготовки предстоящей быстрой, случайной и интенсивной (то есть катастрофической) перестройки рассматриваемого объекта. По аналогии с [12–18] в роли основной гипотезы в этой статье вводится предположение о статистической независимости (или слабой зависимости) двух этих случайных слагаемых. При ее обосновании укажем, например, что применительно к землетрясениям физические поля, создаваемые явлениями разлома литосферных плит на ослабленных участках земной коры в зоне формирующегося гипоцентра, почти всегда являются независимыми от «обычных» измерений соответствующих природных феноменов.

На рисунке 1 схематически изображены плотности вероятности $\rho_1(w)$ и $\rho_2(w)$ для слагаемых $x_1(t)$ и соответственно $x_2(t)$. Здесь вводятся обозначения:

$$\rho_{1,2}(w) = \sum_{m=0}^{N-1} P_{1,2}(m) \delta(w - m). \quad (2)$$

В выражении (2) $\delta(Z)$ – дельта-функция Дирака, а коэффициенты $P_{1,2}(m)$ равны вероятностям попадания значений случайных величин $x_{1,2}(t)$ (если бы их можно было изменить по отдельности) в интервалы вида

$$\begin{aligned} x_{\min} + mh &\leq x(t) < x_{\min} + (m+1)h, \\ N &= \left[\frac{x_{\max} - x_{\min}}{h} \right], \quad 0 \leq m \leq N-1. \end{aligned} \quad (3)$$

В (3) квадратные скобки означают целую часть числа, величины x_{\min} и x_{\max} есть наименьшее и соответственно наибольшее значения $x(t)$, а множитель h равен ширине интервала дискретности. На рисунке 1 с целью большей наглядности дискретные зависимости $\rho_{1,2}(w)$ приведены в виде непрерывных функций. Полагаем, что в общем случае $|x_2(t)| \ll |x_1(t)|$ (поскольку почти всегда влияние процессов подготовки катастрофы или аварии много меньше фонового шума работы соответствующей системы). Поэтому горизонтальный масштаб распределения $\rho_2(w)$ будем считать много меньшим, чем для $\rho_1(w)$.

Следует подчеркнуть, что обе данные зависимости $\rho_1(w)$ и $\rho_2(w)$ – случайные функции, поскольку число проведенных измерений всегда является конечным. Как это изображено на рисунке 1, распределение $\rho_1(w)$ в общем случае является «шероховатым» с учетом наличия случайных мелкомасштабных флуктуаций. Их эффективный период определяется значением ширины h интервала дискретизации, которое при необходимости может быть задано сколь угодно малым. Отметим, что аналогичные флуктуации существуют и для плотности вероятности $\rho_2(w)$, но при дальнейших расчетах не играют принципиальной роли в силу ее узости по сравнению с $\rho_1(w)$.

Для плотности вероятности $\rho(w)$, отвечающей измерениям суммы (1) двух независимых случайных слагаемых x_1 и x_2 , существует представление в виде свертки

$$\rho(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{x_1}(w') \rho_{x_2}(w - w') dw'. \quad (4)$$

Для эффективной ширины $S \sim 2\sigma_2$ плотности вероятности $\rho_{x_2}(w)$, где σ_2 – стандарт флюктуаций случайной величины x_2 , потребуем выполнения условия

$$S \gtrsim (2 \div 3)h. \quad (5)$$

Тогда, как и в [12–16], приходим к выводу, что при интегрировании вида (4) будет иметь место усреднение указанных выше мелкомасштабных флюктуаций зависимости $\rho_1(w)$. В результате для экспериментально полученного распределения $\rho(w)$ ансамбля измеренных значений $x(t)$ с большой вероятностью произойдет значительное уменьшение их эффективной амплитуды по сравнению с распределением $\rho_1(w)$ для измерений одного фонового шума $x_1(t)$ (если допустить, что его каким-то образом удалось измерить в отдельности от случайного слагаемого $x_2(t)$). Для иллюстрации подобного эффекта на рисунке 1 также схематически изображена в форме «гладкой» кривой плотность вероятности $\rho(w)$, отвечающая распределению значений реально измеряемого случайного процесса $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$.

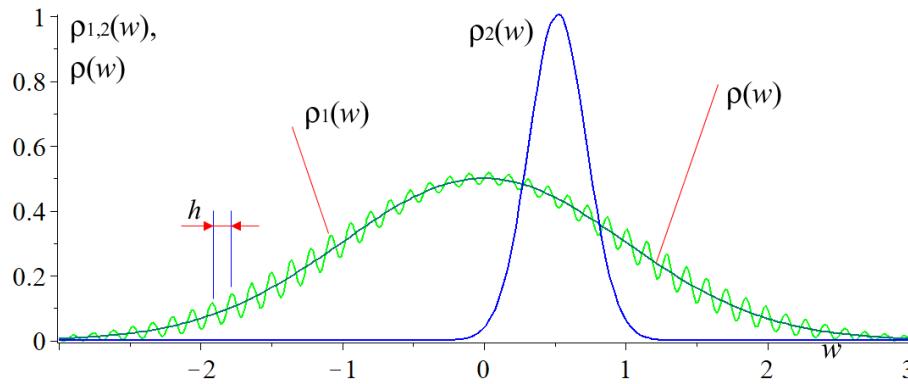


Рис. 1. Схематические изображенные плотности вероятности $\rho_1(w)$, $\rho_2(w)$ и $\rho(w)$

Рассматриваемое изменение эффективной амплитуды мелкомасштабных флюктуаций эмпирического вероятностного распределения (равносильное переходу на рисунке 1 от «шероховатой» кривой $\rho_1(w)$ к «гладкой» зависимости $\rho(w)$), возникающее при появлении в измеряемом сигнале «дополнительного» независимого слагаемого $x_2(t)$, может быть математически определено с помощью ряда известных методов. В частности, удобным для использования здесь является дискретное преобразование Фурье.

Для усиления обсуждаемого эффекта в дальнейшем вместо непосредственно измеряемых значений случайной величины $x = x(t)$ будем рассматривать свойства нелинейной функции вида

$$F[x(t)] = \sin(|Wx(t)|^\alpha), \quad (6)$$

где W и α – задаваемые параметры. Статистический смысл такого перехода состоит в том, что отвечающая функции $F[x(t)]$ плотность вероятности $\rho_F(w)$ обладает интегрируемыми особенностями вида $\sim [1 - w^2]^{-1/2}$. В частности, для максимально простого случая $W = 1$, $\alpha = 1$, при безразмерности значений $x(t)$, замене в (6) модуля $|x(t)|$ на $x(t)$ и выполнении условия $-\pi/2 \leq x \leq \pi/2$ получаем

$$\rho_F(w) = [1 - w^2]^{-1/2} \rho_1\{\arcsin(w)\}. \quad (7)$$

Как легко понять, при $|w| \rightarrow 1$ указанные выше мелкомасштабные шероховатости, которые будут присутствовать как для случайной функции $\rho_1(w)$ (см. рис. 1), так и для $\rho_1\{\arcsin(w)\}$, значительно увеличатся по амплитуде при умножении на стремящийся к бесконечности сомножитель $[1 - w^2]^{-1/2}$. Поэтому при выполнении (5) с большой вероятностью произойдет усиление различий между функциями $\rho_F(w)$ при отсутствии (см. «шероховатую» широкую кривую $\rho_1(w)$ на рисунке 1) и наоборот, при существовании (см. «гладкую» зависимость $\rho(w)$) независимого случайного слагаемого $x_2(t)$ в правой части (1). Можно сказать, что использование нелинейного преобразования вида (6)

приводит к своего рода эффекту «увеличительного стекла», при помощи которого оказывается возможным исследовать свойства локальных участков экспериментально полученной зависимости $\rho(w)$. Введенные в (6) параметры W и α задают протяженность интервала наиболее сильного стремления к бесконечности для интегрируемой случайной зависимости $\rho_F(w)$.

С учетом проведенных расчетов далее каждому отрезку реализации измеряемой случайной величины $x(t)$, имеющему номер l , ставится в соответствие статистический функционал вида

$$L(n) = \frac{A}{M} \sum_{l=n-M+1}^n |\mathcal{L}_l|, \quad \mathcal{L}_l = \sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_{m,l}. \quad (8)$$

(Далее применительно к исследованию медицинских задач этот функционал будет несколько модифицирован.)

В (8) аргумент n отвечает моменту времени завершения отрезка реализации с этим номером, множитель $A = 1000$ введен с целью перехода к удобной для анализа области значений данного функционала, а значение M – ширина интервала усреднения по последовательным отрезкам реализации. Подобно (3), в (8) любой множитель $P_{m,l}$ под знаком суммы равен отвечающей данному отрезку реализации вероятности попадания значения функции $F[x(t)]$ от измеренной случайной величины $x = x(t)$ в интервал номер m области значений вида

$$\begin{aligned} F[x]_{\min} + mh \leq F[x(t)] &< F[x]_{\min} + (m + 1)h, \\ 0 \leq m \leq N - 1, \quad N &= 2[h^{-1}]. \end{aligned} \quad (9)$$

В (9), как и в (3), квадратные скобки в выражении $N = 2[h^{-1}]$ для общего количества интервалов N означают целую часть числа. (В (9) принято во внимание, что разность между наибольшим ($F[x]_{\max}$) и наименьшим ($F[x]_{\min}$) значениями функции (6) не превосходит двух, откуда получаем соотношение для N). Кроме того, в (8) аргумент p есть переменная Фурье. Укажем, что с учетом используемого математического аппарата предлагаемый подход можем назвать методикой спектрально-вероятностного анализа.

Отметим также, что рассматриваемое уменьшение эффективной амплитуды мелкомасштабных флуктуаций плотности вероятности означает ее приближение к неизвестному «истинному» распределению, которое соответствовало бы неограниченно большому числу измерений, проводимых за произвольно длительное время. Такое распределение означало бы переход к ситуации максимального хаоса с неограниченно высоким ростом энтропии.

Далее предлагаемый подход апробируется применительно к солнечным вспышкам высокой энергии, сильным землетрясениям и заболеваниям человеческого организма.

Результаты экспериментов

1. Проведение расчетов, связанных с прогнозированием солнечных вспышек высокой энергии

На рисунке 2 приведена полученная в [12] зависимость $L(n)$ при анализе изменений статистических свойств интенсивности рентгеновского излучения Солнца диапазона длин волн $0.5 \div 4 \text{ \AA}$ перед вспышкой класса X2.2, которая произошла 20 апреля 2022 года (здесь и далее используется время UTC). В данном случае, как и далее на рисунке 3, в (6) принято $W = 10^{10} (\text{м}^2/\text{Вт})$ и $\alpha = 1$. Здесь и на рисунке 3 моменты вспышек высокой энергии отмечены сплошными красными вертикальными прямыми линиями. В данном случае длительность одного отрезка реализации была принята равной $\Delta t = 3000$ секунд, каждой из которых отвечало одно из $N_1 = 3000$ измерений. В (8) усреднение проводилось по $M = 10$ последовательным отрезкам реализации. Таким образом, любое значение функционала $L(n)$ отвечает 30000 последовательным измерениям интенсивности рентгеновского излучения Солнца. При анализе данного рисунка, так же как и далее рисунка 3, используются понятия (см. [12]) «локальные тренды», «каналы», «тестирование», «скользящие границы».

(а). Назовем локальными трендами (ЛТ) участки зависимости $L(n)$, находящиеся между точками экстремумов рассматриваемой кривой и отвечающие вариациям δL (равным разности значений функционала $L(n)$ в точках границ ЛТ, которые отвечают максимумам и минимумам наподобие точек a и соответственно b на рисунке 2), удовлетворяющим условию $\delta L \leq \Delta L_{Max}$.

Здесь ΔL_{Max} – наибольшая вариация значений $L(n)$ в пределах интервала времени от начала отсчета и до момента рассматриваемого события, то есть разность значений наиболее высокого максимума и самого глубокого минимума (точки A и соответственно B на рисунке 2) функционала $L(n)$ на указанном отрезке времени. При этом вводится условие, что геометрическое отклонение Δs кривой $L(n)$ от прямолинейного отрезка, соединяющего граничные точки любого локального тренда (см. рис. 2), удовлетворяет условию

$$\Delta s \leq 0.2\Delta l, \quad (10)$$

где Δl – длина этого отрезка. В (10) расстояния Δs и Δl , так же как и введенный далее угол $\Delta\alpha$, рассчитываются при нормировке горизонтальных координат на время n_0 начала вспышки, а вертикальных – на наибольшее значение функционала $L(n)$ на промежутке $0 \leq n \leq n_0$. Условие (10) необходимо для обеспечения квазипрямолинейности локального тренда. На рисунке 2 локальным трендом является, в частности, сегмент ab кривой $L(n)$; здесь же указано расстояние Δs . Точки границ ЛТ будем именовать *направляющими точками*. Полагаем, что каждая такая точка по горизонтали удалена от ближайшей точки кривой $L(n)$ не менее, чем на интервал в 10 часов.

(б). *Каналом* будем именовать совокупность двух прямых, каждая из которых проходит точно через две направляющие точки, и при этом угол $\Delta\alpha$ между направлениями этих прямых удовлетворяет неравенству

$$\Delta\alpha \leq 1.4^\circ. \quad (11)$$

В (11) угол $\Delta\alpha$ определяется при помощи скалярного произведения двух векторов, параллельных границам канала. Интервал времени между направляющими точками, через которые проведена граница канала, должен составлять не менее 10 часов. На рисунке 2 отмечены каналы: 1–2, 2–3, 4–5, 6–7, 8–9, образуемые парами наклонных пунктирных прямых отрезков, углы между которыми удовлетворяют (11).

(с). Осевой линией будем именовать прямую, проходящую через начальную и конечную точки локального тренда. Осевым сектором будем именовать пару осевых линий, удовлетворяющую условию (11). В роли момента регистрации предвестника приближающейся солнечной вспышки будем рассматривать последнюю по времени направляющую точку, через которую проходит соответствующая граница осевого сектора (точка d на рисунке 3 для осевого сектора с границами A_1 и A_2).

(д). Термин *тестирование* означает либо пересечение в некоторой точке кривой $L(n)$ и соответствующей границы канала, либо прохождение (вне зависимости от факта пересечения или его отсутствия) границы канала на расстоянии ΔL_t по вертикали от направляющей точки с координатами $\{n_t, L(n_t)\}$, удовлетворяющему условию

$$\frac{\Delta L_t}{L(n_t)} \cdot 100\% \leq \delta, \quad \delta \leq 1.2\% \quad (12)$$

В роли момента регистрации предвестника приближающегося солнечного события рассматривается либо время самого последнего тестирования границ канала зависимостью $L(n)$ при нарушении (12) (например, точка c для канала 8–9 на рисунке 2), либо время тестирования в последней направляющей точке, через которую проведена данная граница канала и после которой границы этого канала вообще не пересекают (и не тестируют при справедливости (12)) кривую $L(n)$. В любом из этих двух случаев будет использоваться термин «точка последнего тестирования».

(е). *Скользящая граница* – прямая линия, проведенная через две направляющие точки и тестируемая кривой $L(n)$ еще как минимум в одной направляющей точке, удовлетворяющей условию (12) (такие точки будем называть дополнительными и выделять на рисунках сплошным эллипсом). Так же как и для каналов, полагаем, что время регистрации предвестника приближающегося события высокой энергии отвечает моменту последнего тестирования (смысл этого термина эквивалентен случаю каналов) кривой $L(n)$ со стороны скользящей границы (см, например, точку d для скользящей границы 12 на рисунке 2). Скользящие границы (на рисунке 2 это прямые 10 и 12) отмечаются сплошными наклонными прямыми линиями.

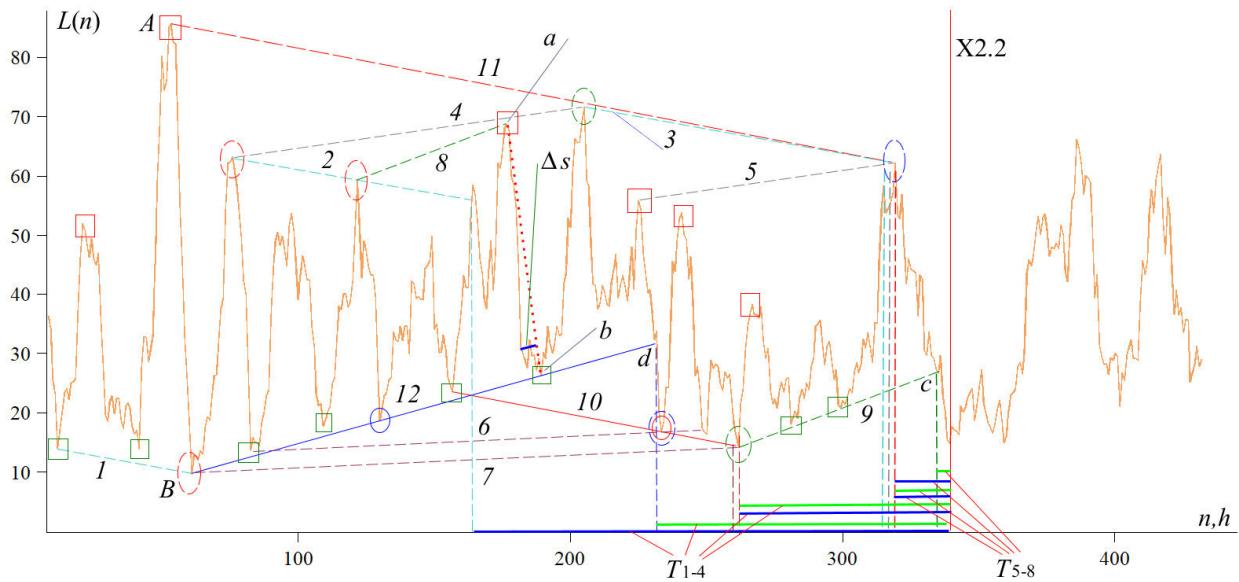


Рис. 2. Зависимость $L(n)$ измерений интенсивности рентгеновского излучения Солнца для интервала времени, включающего момент начала в 3:41 20.04.2022 вспышки класса X2.2. По горизонтальной оси указано время в часах от момента начала отсчета в 00:00:00 6.04.2022

На рисунке 2 те направляющие точки, через которые не проведены каналы или скользящие границы, отмечены красными (точки максимумов) и зелеными (точки минимумов) сплошными прямоугольниками. Кроме того, направляющие точки (назовем их точками связности), через которые проходят несколько границ рассматриваемых линейных структур, выделены пунктирными эллипсами. Наличие пяти таких точек на рисунке 2 позволяет сделать вывод о высокой степени связности процессов, проходящих при подготовке приближающейся вспышки большой мощности.

Как следует из рисунка 2, имеет место феномен «тяготения» моментов регистрации предвестников (отвечающих точкам завершения рассматриваемых геометрических структур), к моменту начала данного солнечного события высокой энергии. Этот же результат получен в [12] и для остальных девяти вспышек максимально возможного X-класса, рассматриваемых в указанной работе. Факт подобной концентрации предвестников может рассматриваться как маркер приближения будущей солнечной вспышки высокой энергии.

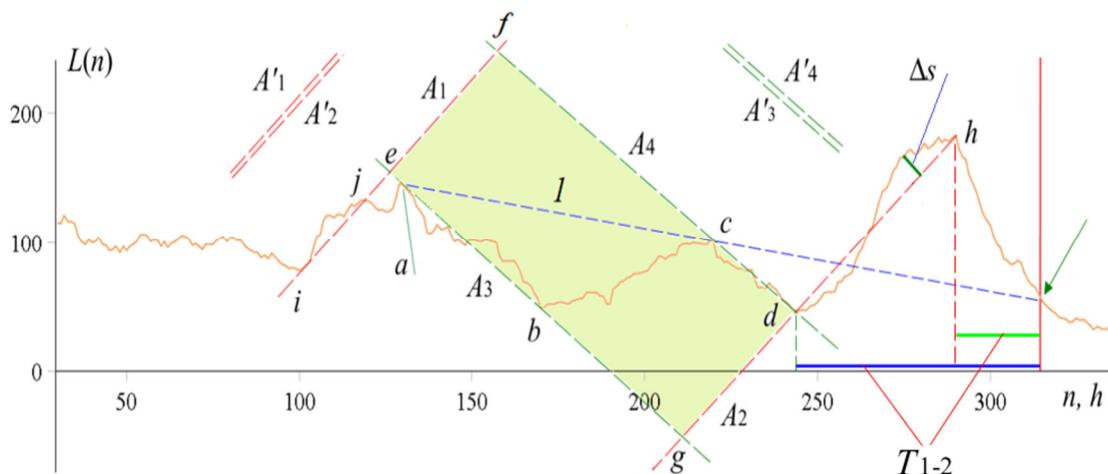


Рис. 3. Зависимость $L(n)$ измерений интенсивности рентгеновского излучения Солнца для интервала времени, включающего момент начала в 02:34 14.07.2024 вспышки класса X2.2. По горизонтальной оси указано время в часах от момента начала отсчета в 00:00:00 01.07.2024

На рисунке 3 приведены результаты расчетов для солнечной вспышки класса X1.2, произошедшей 14.07.2024, также применительно к измерениям рентгеновского диапазона длин волн $0.5 \div 4 \text{ \AA}$ излучения Солнца (см. [13]). Здесь осевые линии A_1, A_2, A_3 и A_4 проведены через точки $\{i, j\}, \{d, h\}, \{a, b\}$ и соответственно $\{c, d\}$. Степень параллельности границ осевого сектора A_1-A_2 иллюстрируется парой параллельных им прямых A'_1 и соответственно A'_2 , а осевого сектора A_3-A_4 – имеющей аналогичный смысл парой прямых A'_3 и A'_4 . В данном случае значения Δt и N_1 – те же, что и на рисунке 2, в то время как усреднение в (8) проводится по $M = 30$ отрезкам реализации. Этот факт является значительным ужесточением условия применения методики по сравнению со случаем на рисунке 2. Тем не менее, как видно из рисунка 3, по-прежнему имеет место эффект «тяготения» моментов регистрации предвестников к времени начала данной вспышки. В роли времени регистрации предвестника приближающейся вспышки здесь учитываются моменты завершения указанных осевых секторов. Их границы формируют «параллелограмм вспышки» $efdg$. Отметим, что хотя в данном случае имеет место всего 6 направляющих точек (через все из них проходят рассматриваемые осевые линии), тем не менее на декартовой плоскости возникает совокупность вполне детерминированных геометрических структур. Аналогичные эффекты получены в [10] для еще двух рассматриваемых там солнечных событий X-класса.

2. Проведение расчетов, связанных с прогнозированием землетрясений

На рисунке 4 при значениях $N_1 = 300$ и $M = 100$ приведена зависимость $L(n)$ для измерений E -компоненты магнитного поля, проведенных в период с 00:00:00 17.06.2022 по 10:00:00 26.06.2022 на Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) [11]. Здесь и на рисунке 5 моменты начала рассматриваемых землетрясений отмечены сплошными красными вертикальными прямыми линиями. В данном случае, как и далее на рисунке 5, в (6) значения $W = 10^9 \text{ Тл}^{-1}$ и $\alpha = 1$. Указанный интервал времени включает момент 18:28:37 25.06.2021 начала землетрясения магнитудой 5.4 в районе города Яйладере в восточной части Турции. На этом рисунке интервалы $T_{E,3}$ и $T_{E,5}$ отвечают точкам последнего тестирования для скользящих границ 7 и 8, а промежутки времени $T_{E,1}, T_{E,2}$ и $T_{E,4}$ (в данном случае $T_{E,4} = T_{E,5}$) соответствуют аналогичным точкам для каналов 3–4, 1–2 и 5–6. Пары прямых $3' - 4'$, $1' - 2'$ и $5' - 6'$ иллюстрируют степень параллельности границ этих каналов. Как это было и ранее применительно к солнечным вспышкам класса X, в данном случае имеет также место эффект тяготения моментов последнего тестирования рассматриваемых геометрических структур к времени начала данного сейсмического события. Наличие пяти точек связности (как и на рисунке 2, они отмечены пунктирными эллипсами) позволяет сделать вывод о высокой степени связности процессов, проходящих при подготовке приближающейся вспышки большой мощности. Как следует из рисунка 4, имеет место тяготение моментов регистрации предвестников к моменту начала рассматриваемого землетрясения. Факт подобной концентрации может рассматриваться как маркер приближения предстоящего события.

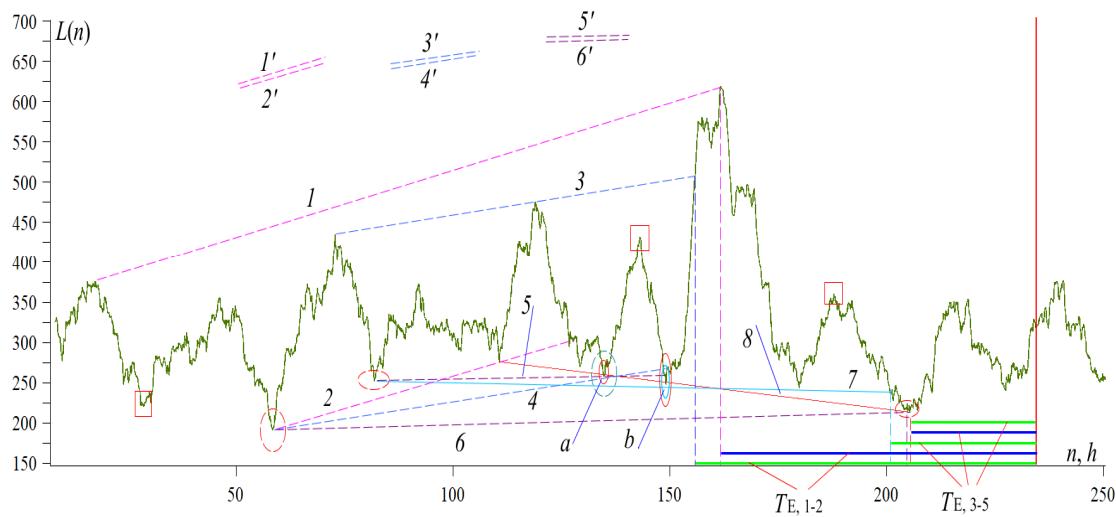


Рис. 4. Зависимость $L(n)$ для измерений E -компоненты магнитного поля, проведенных в период с 00:00:00 17.06.2022 по 10:00:00 26.06.2022

На рисунке 5 приведена зависимость $L(n)$, отвечающая измерениям Н-компоненты магнитного поля за 19 и 20 августа 2019 (КрАО) (см. [12]). Этот период включает момент 09:34:54 20.08.2019 начала землетрясения магнитудой 4.4, которое произошло вблизи южного побережья Турции. В связи с малой магнитудой события в данном случае имеет место только одна детерминированная геометрическая структура в виде скользящей границы I , которая проведена через направляющие точки a и c при дополнительной точке b . С учетом малого (по сравнению с рисунком 4) рассматриваемого интервала времени минимальное горизонтальное расстояние от любой направляющей точки до другой точки кривой $L(n)$ в данном случае принято равным 5 часам. Отметим, что в данном случае в (5) коэффициент $\delta = 0.06\%$, что свидетельствует об исключительной точности прохождения прямой I через «дополнительную» точку b . Как и ранее, момент последнего тестирования скользящей границы I (в точке d) оказывается значительно приближен к времени начала данного землетрясения.

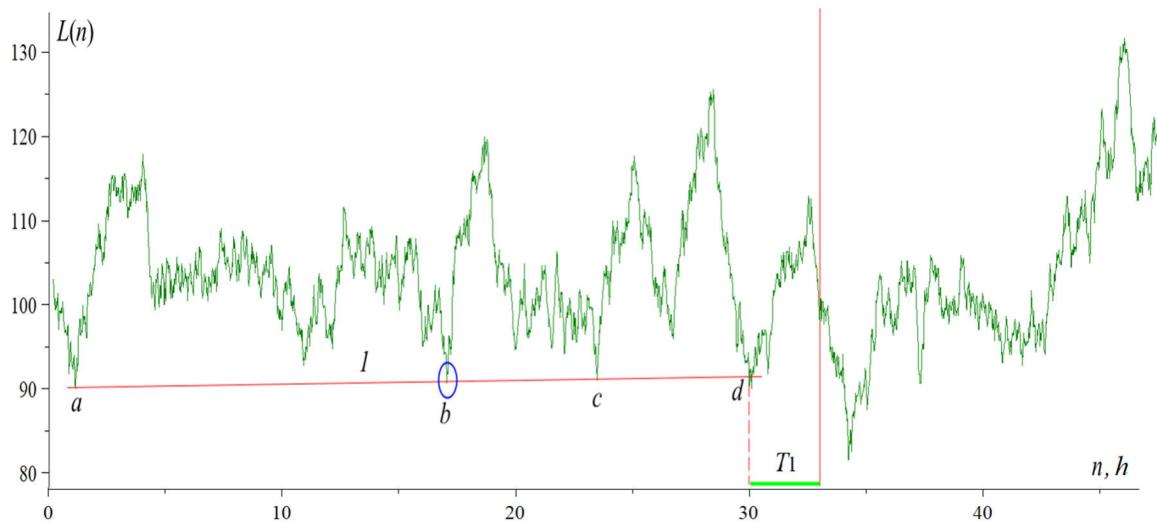


Рис. 5. Зависимость $L(n)$, построенная по измерениям магнитного поля за 19 и 20 августа 2019 года (КрАО)

3. Проведение расчетов, связанных с прогнозированием изменения состояния здоровья человека

Применяемый подход, основанный на изменении уровня хаоса проводимых измерений при возникновении в системе независимого случайного процесса, оказывается вполне эффективным и при прогнозировании заболеваний человека. На рисунке 6 приведены $N_G = 83$ зеленых кривых (рис. 6a), которые отвечают зависимостям $L(p)$ для выздоровевших пациентов, поступивших в стационар с острой декомпенсацией сахарного диабета, а также $N_R = 20$ красных линий (рис. 6a и 6b), соответствующих случаям неблагоприятного исхода [16].

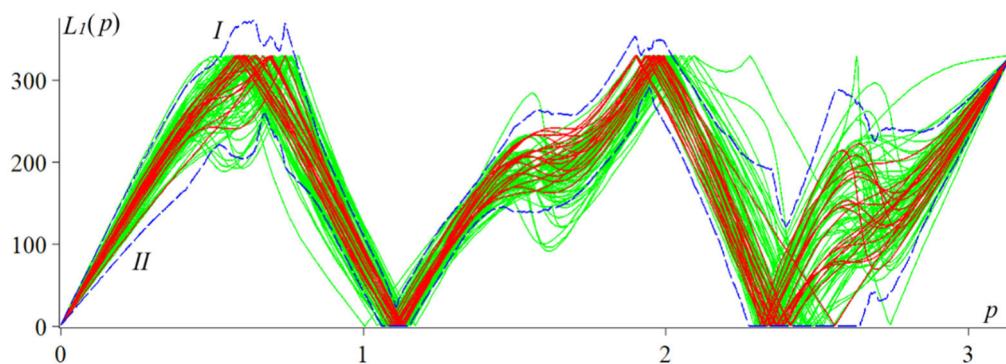


Рис. 6a. Ансамбли из $N_G = 83$ зеленых и $N_R = 20$ красных линий – зависимости $L_1(p, h, W, \alpha)$ (построенные при $h = 0.15, W = 1$ и $\alpha = -1.495$) для выздоровевших пациентов и соответственно для больных с неблагоприятным исходом

На рисунке 6 каждая кривая $L_1(p)$ отвечает статистическому функционалу вида

$$L_1(p) = L_1(p, h, W, \alpha) = \left| \operatorname{Arg} \left(\sum_{m=0}^{N-1} P_m e^{\frac{i\pi}{N}(ipm)} \right) \right|, \quad (13)$$

который соответствует своемульному и основывается на том же, что и (8), вероятностном эффекте. Здесь P_m есть вероятность попадания значения аналогичной (6) функции

$$F[x(j)] = \sin[(W|x(j)|)^\alpha], \quad (14)$$

от результата $x(j)$ проведенного медицинского анализа биохимии крови пациента, полученного на момент поступления в клинику, в ячейку номер m вида (8). При этом для рисунков 6а, б полагаем $h = 0.15, W = 1$ и $\alpha = -1.495$. В (14) индекс j принимает значения $j = 1, 2, \dots, 20$, то есть рассматривается ансамбль из $N_a = 20$ чисел, являющихся результатами соответствующих анализов. Они включают в себя данные таких лабораторных показателей, как глюкоза плазмы при поступлении, показатели кетонурии, данные кислотно-основного состояния (рН, лактат, осмоляльность, натрий, калий), скорость клубочковой фильтрации, лейкоциты крови. В (13) символ Arg означает аргумент локального ряда Фурье $\sum_{m=0}^{N-1} P_m e^{\frac{i\pi}{N}(ipm)}$ на плоскости комплексной переменной. Отметим, что функционал (8) можем рассматривать как разновидность входящей в (13) суммы при условии, что в (13) Фурье-переменная $p = \pi$, а в (8) значение $M = 1$.

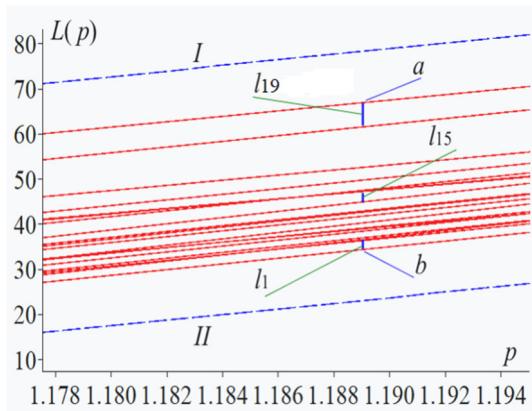


Рис. 6b. Совокупность расстояний $l_m, m = 1, 2, \dots, 19$, при заданном значении Фурье-переменной p

На рисунках 6а, б синие пунктирные кривые I и II означают границы канала, такого, что вероятность выхода красной линии, отвечающей новому больному с неблагоприятным исходом, за эти границы при заданном значении p не превышает 5 %. Данный канал строится на основании неравенства Чебышева по ансамблю расстояний $l_m, m = 1, 2, \dots, 19$, изображенных на рисунке 6б.

На рисунке 6с приведена в логарифмическом масштабе совокупность значений усредненных площадей $L_{G,M}$ суммарного выхода зеленый кривых $L_1(p)$ из пределов канала I-II (зеленые кружки; каждый из них соответствует выздоровевшему больному). При этом имеет место усреднение $L_{G,M} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N G_M(h, W, \alpha_j)$ по ансамблю наборов параметров (см. (14)) вида

$$h = 0.15, W = 1, \alpha = \alpha_j = -1.479 + 0.02(j-1), j = 1, 2, \dots, N = 15. \quad (15)$$

Здесь M – номер, сопоставляемый пациенту, а значение $L_{G,M}$ – указанная площадь выхода из границ данного канала при одном наборе параметров (15). Здесь же приведены красные кружки. Каждый из них соответствует полученной при аналогичном усреднении общей площади выхода соответствующей красной кривой из границ канала I-II, который при всех указанных значениях параметров строится без учета данной кривой.

Как следует из анализа рисунка 6с, более половины зеленых кружков находятся в верхней области, проходящей выше синего горизонтального пунктирного барьера. Здесь почти нет (кроме одного) кружков красного цвета. Это означает, что если для нового больного при поступлении в стационар результаты анализов соответствуют попаданию в данную область, то вероятность благоприятного исхода для него весьма высока. Данный факт позволяет сконцентрировать особое внимание

медицинского персонала на тех больных, которые оказываются в нижней области, где расположены 19 красных кружков. Это повышает вероятность правильного выбора пациентов с повышенной степенью риска, тем самым уменьшая для них возможность неблагоприятного исхода. Отметим, что чувствительность применяемого алгоритма существенно возрастает при увеличении числа исходных рассматриваемых результатов медицинских анализов.

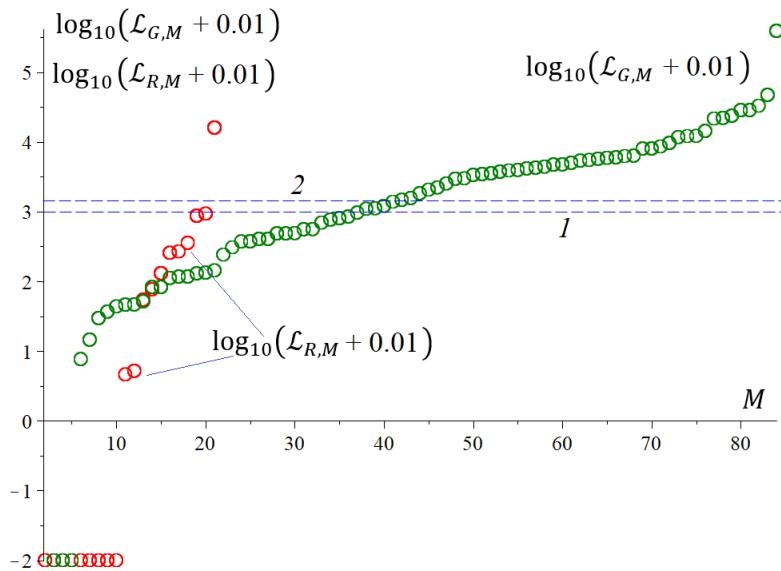


Рис. 6c. Логарифмическое представление для 83 средних значений $\mathcal{L}_{G,M}$ и 20 подобных усреднений $\mathcal{L}_{R,M}$ (зеленая и соответственно красная последовательности кружков)

Обсуждение результатов

В результате применения используемой методологии во всех случаях удалось свести задачу прогнозирования состояния рассматриваемых объектов к инженерно-геометрическому анализу свойств ансамблей кривых на декартовой плоскости. Во всех случаях использование предлагаемого алгоритма было основано на феномене возникновения «естественной регуляризации» свойств соответствующих вероятностных распределений при существовании процесса подготовки катастрофического перехода любой физической или биологической системы.

Как показали проведенные расчеты, и для солнечных событий, и применительно к землетрясениям имеет место эффект возникновения геометрических структур высокой степени детерминированности. Моменты их завершения тяготеют к времени начала как солнечных вспышек, так и сейсмических событий. Возникновение большого числа точек связности на рисунках 2 и 4 позволяет сделать вывод о высокой согласованности процессов подготовки соответствующих катастрофических явлений. Концентрация рассматриваемых предвестников может считаться маркером предстоящего события. Этот эффект имеет место перед всеми исследованными солнечными вспышками X-класса и сильными землетрясениями. Однотипные и высоко детерминированные геометрические феномены, возникающие применительно к вспышкам высокой энергии и сильным землетрясениям, позволяют прийти к выводу о том, что уровень хаоса в сложных системах самой разной природы перед их катастрофическими перестройками начинает изменяться по почти детерминированным законам. С учетом взаимно подобного поведения красных кривых на рисунке 6 такой вывод оказывается справедливым и для опасных состояний организма человека. Этот факт подтверждается также и единством математического аппарата, примененного в статье для анализа катастрофических процессов совершенно разной природы.

Отметим также, что одним из главных результатов данной работы является переход к формированию языка, то есть системы взаимно согласованных понятий и определений, с применением которого становятся «читаемыми» процессы, происходящие в сложных системах в период подготовки их предстоящего катастрофического изменения.

Заключение

В данной статье рассматривается алгоритм обоснования вывода о высокой вероятности приближения катастрофического или опасного состояния системы. В рамках модификации единого математического подхода, основанного на методике спектрально-вероятностного анализа, предлагаемая методика была апробирована как для природных катастрофических явлений (вспышки на Солнце и землетрясения), так и применительно к заболеваниям человека, несущим фактор особого риска. Во всех случаях использовался вероятностный эффект, состоящий в стремлении эмпирического вероятностного распределения значений исследуемого процесса к состоянию идеального хаоса при возникновении в системе случайного слагаемого, независимого от совокупности обычно протекающих явлений и являющегося неизбежным следствием ситуации подготовки сильного, случайного и быстрого, то есть катастрофического, преобразования свойств любой рассматриваемой системы.

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-20019, <https://rscf.ru/project/25-79-20019/>.

Научный руководитель: Вольвач Александр Евгеньевич, Крымская астрофизическая обсерватория.

Список литературы

1. A comparison of flare forecasting methods. I. Results from the "All-clear" workshop / G. Barnes, K. Leka, C. Schrijver, et al. // ApJ. 2016. Vol. 829. P. 89.
2. A Comparison of Flare Forecasting Methods. II. Benchmarks, Metrics, and Performance Results for Operational Solar Flare Forecasting Systems / K. Leka, S.-H. Park, K. Kusano, et al. // ApJ. 2019. Vol. 243. P. 36.
3. A physics-based method that can predict imminent large solar flares / K. Kusano, T. Iju, Y. Bamba, et al. // Science. 2020. Vol. 369. P 587.
4. A Method of Forecasting Solar Activity Based on Radio Astronomical Observations / V.M. Bogod, P.M. Svidskiy, E.A. Kurochkin, et al. // Astrophys. Bull. 73. P. 478.
5. Uyeda S., Nagao T., Kamogawa M. Short-term earthquake prediction: current status of seismo-electromagnetics // Tectonophysics. 2009. Vol. 470, no. 3–4. P. 205–213. // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2010. Vol. 1, no 2. P. 115–155.
6. Добропольский И.А. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.
7. Добропольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физмат, 2010. 230 с.
8. Molchanov O. A., Hayakawa M., Rafalsky V. A. // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. Vol. 29, no 4–9. P. 569–577. Lifespan variation among people with a given disease or condition / Y. Zheng, I. Permanyer, V. Canudas-Romo, et al. // PLOS ONE. 2023. Vol. 18, no. 9. P. e0290962.
9. Mortality among persons with obsessive-compulsive disorder in Denmark / S.M. Meier, M. Mattheisen, O. Mors, et al. // JAMA Psychiatry. 2016. No. 73 P. 268–274.
10. Statistical precursors of solar flares on September 6, 2017, March 23 and May 1, 2024 / A.E. Volvach, L.P. Kogan, L.N. Volvach, I.V. Yakubovskaya // Advances in Space Research. 2025. Vol. 76. P. 551–561.
11. On statistical precursors of solar flares / A.E. Volvach, L.P. Kogan, L.N. Volvach, I.V. Yakubovskaya // Chinese Journal of Physics. 2025. Vol. 97. P. 862–882.
12. On the set of deterministic phenomena preceding the earthquake June 25, 2021 with a magnitude of 5.4 near the city of Yayladere (Turkey) / A.E. Volvach, L.P. Kogan, L.N. Volvach, [et al.] // Romanian Reports on Physics. 2024. Vol. 76, no. 2. P. 704.
13. Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor / A.E. Volvach, L.P. Kogan, V.B. Shtenberg [et al.] // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2022. Vol. 108. P. 106200.
14. Prediction of unfavorable outcome of acute decompensation of diabetes mellitus / L.P. Kogan, K.G. Korneva, A.E. Volvach, et al. // Diabetol Metab Syndr. 2025. Vol. 20, no. 17(1). P. 64.
15. Подтверждение клинического диагноза «шизофрения» по значениям статистических функционалов / Л. П. Коган, А. С. Гордецов, Л. Н. Касимова [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 2. С. 146.
16. Диагностика заболевания по значениям статистических функционалов, вычисленных по совокупности ИК-спектроскопических параметров крови / Л.П. Коган, Д.И. Кислицын, О.В. Красникова и др. // Современные технологии в медицине. 2017. № 4. С. 25–35.