DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(1)-8

Анализ регулярности матриц

И.Б. Бурдонов, ORCID: 0000-0001-9539-7853 <igor@ispras.ru>
А.А. Карнов, ORCID: 0000-0002-2066-9946 <karnov@ispras.ru>
Институт системного программирования РАН им. В.П. Иванникова,
109004, Россия, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25

Аннотация. В статье исследуется задача анализа регулярности многомерных матриц, основанной на повторении значимых (не пустых) символов в ячейках матрицы. Такое повторение означает, что при сдвиге матрицы по одной или нескольким её координатам некоторые значимые символы сохраняются. Для каждого сдвига, повторяющегося *r* раз, вводится число регулярности как произведение *rs*, где *s* – число значимых символов, сохраняющихся при всех *r* повторениях сдвига. Вводятся две числовые характеристики регулярности матрицы: сумма регулярности и коэффициент регулярности. Сумма регулярности определяется как сумма чисел регулярности при всех возможных сдвигах матрицы и позволяет сравнивать регулярность матриц одной формы, т.е. одной размерности и одного размера с одинаковым расположением непустых символов. Коэффициент регулярности позволяет сравнивать регулярность произвольных матриц и определяется как процентное отношение суммы регулярности матрицы к сумме регулярности «самой регулярной» матрицы (все значимые символы которой одинаковы) той же формы. Предложены алгоритмы вычисления суммы и коэффициента регулярности матрицы, которые были реализованы в компьютерных программах. В качестве прикладной области в статье используется анализ регулярной структуры стихотворений древнекитайского «Канона стихов» (*Ши цзин*). Стихотворение представляется четырёхмерной матрицей, её координаты – это строфа, строка в строфе, стих в строке и иероглиф в стихе; пустые символы выравнивают размеры стихов, строк и строф. В статье приводятся обобщающие результаты компьютерных экспериментов со всеми 305 стихотворениями *Ши цзина*.

Ключевые слова: многомерные матрицы; регулярность; повторение значимых символов; Канон стихов; *Ши цзин*; 詩經; параллелизм в стихах

Для цитирования: Бурдонов И.Б., Карнов А.А. Анализ регулярности матриц. Труды ИСП РАН, том 34, вып. 1, 2022 г., стр. 101-122. DOI: 10.15514/ISPRAS–2022–34(1)–8

Matrix regularity analysis

I.B, Burdonov, ORCID: 0000-0001-9539-7853 <igor@ispras.ru>
A.A. Karnov, ORCID: 0000-0002-2066-9946 <karnov@ispras.ru>
Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences,
25, Alexander Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia.

Abstract. The paper investigates the problem of analyzing the regularity of multidimensional matrices based on the repetition of significant (non-empty) characters in the matrix cells. Such a repetition means that when the matrix is shifted along one or more of its coordinates, some significant characters are preserved. For each shift repeated *r* times, the regularity number is entered as the product of *rs*, where *s* is the number of significant symbols that persist for all *r* repetitions of the shift. Two numerical characteristics of matrix regularity are introduced: the regularity sum and the regularity coefficient. The regularity sum is defined as the sum of the regularity numbers for all possible matrix shifts and allows you to compare the regularity of matrices of the same form, i.e. the same dimension and the same size with the same arrangement of non-empty characters. The regularity coefficient allows you to compare the regularity of arbitrary matrices and is defined as the percentage of the sum of the regularity of a matrix to the sum of the regularity of the «most regular» matrix (all significant

symbols of which are the same) of the same form. Algorithms for calculating the sum and regularity coefficient of a matrix are proposed and implemented in computer programs. As an applied area, the article uses the analysis of the regular structure of the poems of the ancient Chinese «Canon of Poems» (*Shih-ching*). The poem is represented by a four-dimensional matrix, its coordinates are a stanza, a line in a stanza, a verse in a line, and a hieroglyph in a verse; blank characters equalize the sizes of verses, lines and stanzas. The article presents generalizing results of computer experiments with all 305 poems of *Shih-ching*.

Keywords: multidimensional matrices; regularity; repetition of meaningful symbols; Classic of Poetry; *Shih-ching*; 詩經; parallelism in poems

For citation: Burdonov I.B., Karnov A.A. Matrix regularity analysis. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 34, issue 1, 2022, pp. 101-122 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS–2022–34(1)–8

1. Введение

Статья посвящена исследованию регулярной структуры многомерных матриц, основанной на повторении символов, расположенных в ячейках матрицы. Кроме значимых символов, ячейки матрицы могут содержать пустые символы; размерность и размер матрицы вместе с расположением пустых символов определяют класс матриц одинаковой формы. Целью было определение числовой характеристики регулярности, которая позволяла бы сравнивать регулярность матриц одинаковой формы, а также числовой характеристики, позволяющей сравнивать регулярность произвольных матриц, в том числе, имеющих разную форму.

Эта задача возникла при структурном анализе стихотворений древнекитайского «Канона стихов» – *Ши цзин* 詩經 (другой, распространённый, но не точный, перевод – «Книга Песен»). Известно, что в этих стихотворениях помимо рифм (все стихи *Ши Цзина* рифмованные) много параллелизмов, в том числе построенных на повторении иероглифов и групп иероглифов, которое мы будем называть регулярностью. Задача заключается в выявлении регулярной структуры стихотворения, введении числовой меры регулярности и сравнении разных стихотворений по этой мере. Регулярность такого рода в стихах *Ши цзина* (и не только в них) эстетически значима, подобно рифмовке, поскольку создаёт определённый ритмический рисунок стихотворения. Это особенно верно для китайских стихов, которые представляют собой не только звуковую (стихи слушают), но и графическую (стихи смотрят) картину, что особенно ярко проявляется в каллиграфии.

Более того, структурный анализ древнекитайских (и средневековых) китайских текстов, особенно, канонов (*цзин* 經), со 2-й половины XX в. составил содержание целого направления в российской (и не только) синологии: «структурная или структурно-семантическая методология в изучении китайской классики, тесно связанная с поисками аутентичной методологии у самих китайских классиков» [1]. «Чрезвычайно возросший среди китайских ученых с началом идеологической перестройки в конце 1970-х – начале 1980-х интерес к методологическим аспектам собственной классической философии вдохновил и опередивших их российских исследователей, среди которых изучение этой проблематики на рубеже 1950-х – 1960-х было начато В.С. Спириным (1929-2002), в середине 1970-х развито А.М. Карапетьянцем и А.И. Кобзевым, с середины 1980-х продолжено В.Е. Еремеевым, С.В. Зининым, М.В. Исаевой, В.В. Лихтман/Дорофеевой, А.А. Крушинским и др.» [там же].

Данное направление берёт на вооружение формальный подход к тексту, отвлекаясь от его содержания: без этого, по Спирину, текстология оказывается не столько наукой, сколько разновидностью эссеистики, в которой «главную роль играют интуиция и эрудиция, а иногда и просто личный авторитет и другие случайные обстоятельства» [2]. «Обращение к форме как к первому и важнейшему фактору понимания содержания является одной из основных особенностей структурного анализа» [там же]. Задачей такого формального подхода в первую очередь становится «изучение параллелизмов в древнекитайских текстах» [там же]. Спирин вводит понятие «универсального параллелизма», в котором, с одной стороны, 1) достаточно широко трактуется совпадение параллельных мест текста: они не обязательно тождественны, но «в чём-то тождественны», а с другой стороны, 2) сам текст понимается не обязательно (и не столько) как линейная последовательность символов, а, скорее, как многомерная структура.

Первое ведёт к введению тех или иных математических отношений эквивалентности на отрезках текста, а второе – к математическому понятию многомерной матрицы. В данной работе мы ограничиваемся вторым, а эквивалентность будем понимать предельно узко – как равенство, совпадение. С учётом этого наше понятие регулярности, фактически, совпадает с понятием универсального параллелизма у Спирина.

Выбор в качестве предметной области именно древнекитайской поэзии объясняется ещё и особенностями китайской иероглифической письменности, в которой иероглифы представляет собой удобные «атомы», из которых строятся «молекулы» стихотворений и вообще текстов. В китайском языке (особенно древнем) слову, как правило, соответствует один иероглиф, который не меняется при изменении рода и числа, не склоняется по падежам, что значительно облегчает анализ регулярностей, построенных на повторении элементов текста. И хотя сами параллелизмы (в широком смысле) и основанная на них ритмика характерны для многих древнекитайских текстов (особенно, канонов), именно в стихах это особенно значимо с эстетической точки зрения.

Структурный анализ *Ши цзина* проводился ранее либо на макроуровне канона в целом, без исследования внутренней структуры самих стихотворений[3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], либо как анализ отдельных стихотворений [11], [12], [13]. Можно указать и другие работы по структурному анализу текста, не только *Ши цзина*:[11], [12], [13], [14], [15]. В нашей работе впервые проводится систематический анализ внутренней формальной структуры всех стихотворений *Ши цзина*, основанной (это нужно ещё раз подчеркнуть) на буквальном повторении некоторых иероглифов или групп иероглифов в пределах стихотворения.

В данной статье задача анализа регулярности многомерности матриц ставится и решается в общем виде, а иллюстрируется анализом регулярности стихотворений *Ши цзина*, полученным с помощью компьютерных экспериментов. Разд. 2 вводит представление китайских стихотворений как четырёхмерных матриц, а также для наглядности в виде двумерных матриц на плоскости. В разд. 3 определяются основные используемые далее понятия вектора, матрицы и повторяющейся фигуры в матрице. В разд. 4 устанавливается связь повторения фигур матрицы со сдвигами матрицы по одной или нескольким координатам, и на этой основе вводится число регулярности повторяющейся фигуры. В разд. 5 вводится сумма регулярности матрицы как числовая характеристика, пригодная для сравнения регулярности матриц одной формы, и предлагается алгоритм её вычисления. В разд. 6 решается проблема сравнения регулярности матриц разной формы с помощью введения коэффициента регулярности как процентного отношения суммы регулярности матрицы к сумме регулярности «самой регулярной» матрицы той же формы, и предлагается алгоритм вычисления коэффициента регулярности. В разд. 7 предлагается наглядный способ представления регулярной структуры двумерного представления четырёхмерной матрицы как разбиение на простые многоугольники повторяющихся фигур. Разд. 8 содержит обобщающие результаты, полученные в компьютерных экспериментах на всех 305 стихотворениях *Ши цзина*. Разд. 9 затрагивает проблему параллелизма стихотворений *Ши цзина* при их переводе на другие языки. В Заключении подводятся итоги исследования и намечаются направления дальнейших исследований.

2. Представление стихотворения Ши цзина в виде матрицы

Стихотворение *Ши цзина* состоит из строф, строфа состоит их групп стихов– n-стиший (в основном, двустиший), стих состоит из некоторого числа (в основном четыре) иероглифов. Традиционно китайский текст записывался по столбцам сверху вниз и справа налево без знаков препинания. В современной записи иероглифы записываются по горизонтали слева направо, строфы разделяются пустой строкой, n-стишие соответствует строке (разделяются

переводом строки), стихи в строке разделяются знаками препинания (пробелы, запятые, точки и т.п.). Такое стихотворение мы будем представлять в виде четырёхмерной матрицы, в ячейке которой находится иероглиф, четыре координаты соответствуют строфам, строкам в строфах, стихам в строках и иероглифам в стихах. Знаки препинания опускаются. Поскольку стихи могут состоять из разного числа иероглифов, строки – из разного числа стихов, а строфы – из разного числа строк, будем подравнивать их по самым длинным стихам, строкам и строфам, соответственно. Для этого в конце короткого стиха добавляются пустые символы, в конце коротких строк – пустые стихи (состоящие из пустых символов), в конце коротких строф с пустые строки (состоящие из пустых стихов).

В примерах при изображении на плоскости будем использовать двумерную матрицу, в которой строка матрицы соответствует строке стихотворения, а столбец – позиции иероглифа в стихе и стиха в строке. Ячейки, добавленные для выравнивания стихов, строк и строф, перечёркиваются двумя диагоналями. Разделители стихов и строф – двойные линии. Такое представление четырёхмерной матрицы на плоскости предназначено только для наглядности примеров и не используется в предлагаемом формализме и алгоритме. Эти алгоритмы применимы к матрицам любых размерностей, но результаты для четырёхмерной матрицы и её двумерного представления будут разными.

Из такого представления стихотворения традиционная запись получается транспонированием матрицы, затем отражением слева направо и затем удалением пустых ячеек со сдвигом вверх. На рис. 1 дан пример стихотворения в этих трёх видах записи: современная, в виде матрицы и традиционная. На этом рисунке видны основные виды регулярности: повторяющиеся иероглифы, несколько одинаковых иероглифов в строке или в столбце, а также другие повторяющиеся «фигуры» иероглифов.

Рис. 1. Стихотворение № 5 (1.1.5) 螽斯 чжун сы – Саранча

Fig. 1. Poem No. 5 (1.1.5) 螽斯 Jung si - Locust

Абстрагируясь от иероглифов и китайских стихотворений, задача формулируется как анализ регулярности в t-мерной матрице, где $t \geq 1$,введении числовой меры регулярности и сравнении разных матриц по этой мере. Мы будем рассматривать регулярности, основанных на повторении «фигуры», когда имеется два одинаковых набора символов с тем же относительным расположением друг относительно друга. Одна фигура получается из другой сдвигом по одной или нескольким координатам матрицы.

3. Вектор, матрица и фигура

Рассматриваются вектора $x = (x_1, x_2, \ldots, x_k)$ размерности $k = 1, 2, \ldots$, содержащие целые числа; i-ую компоненту вектора x будем обозначать $x(i) = x_i$. Для векторов одной размерности k определим:

Покомпонентную сумму векторов $(x + y)(i) = x(i) + y(i)$.

Покомпонентную разность векторов $(x - y)(i) = x(i) - y(i)$.

Противоположный вектор $(-x)(i) = -x(i)$.

Модуль вектора $|x|(i) = |x(i)|$.

Вектор $[n]$, все компоненты которого равны числу n: $[n](i) = n$. Если нужно указать размерность t вектора $[n]$, будем писать $[n]_t$.

Покомпонентное отношение частичного порядка:

$y > x \Leftrightarrow x < y \Leftrightarrow \forall\ i = 1, \dots, k\ (\ x(i) < y(i)\ );\ y \geq x \Leftrightarrow x \leq y \Leftrightarrow x = y \vee x < y.$

Линейный порядок векторов:

$x <_l y \Leftrightarrow \exists\ i\ (\ 1 \leq i \leq k\ \&\ x(i) < y(i)\ \&\ (\ \forall\ j\ (\ 1 \leq j < i \Rightarrow x(j) = y(j)\ )\ )\ );$

$y \geq_l x \Leftrightarrow x \leq_l y \Leftrightarrow x = y \vee x <_l y.$

Очевидно, $-x = [0] - x$ и $x - y = x + (-y)$.

Также рассматриваются матрицы размерности $t \geq 1$ в алфавите L, в каждой ячейке которых находится символ из алфавита L, причём некоторые символы могут повторяться. Размер матрицы задаётся вектором n размерности t, где $n(i) \geq 1$, $i = 1, \dots, t$.

Координаты ячейки матрицы задаются вектором x размерности t, где $1 \leq x(i) \leq n(i)$, $i = 1, \dots, t$. В ячейке с координатами x матрицы A находится символ $A(x)$. Матрицу будем просматривать в линейном порядке «$<_l$» векторов, задающих координаты ячеек. Для одномерной матрицы (вектора) это будет просмотр слева направо. Для двумерной матрицы это будет просмотр слева направо сверху вниз.

Пустой символ – выделенный символ ε алфавита L. *Пустой ячейкой* будем называть ячейку, в которой записан пустой символ. В примерах пустая ячейка – это ячейка с белым фоном и отсутствием символа в ней.

Маской будем называть матрицу M размерности t и размера m, в которой каждая ячейка содержит либо пустой символ ε, либо специальный *прозрачный* символ τ, с дополнительным требованием наличия символов τ на «периферии» матрицы M: для $i = 1, \dots, t$ хотя бы в одной ячейке матрицы M с координатами x, где $x(i) = 0$ или $x(i) = m(i)$, имеется символ τ, т.е. $M(x) = \tau$. Для одномерной матрицы (вектора) это означает наличие символа τ в первой и последней компоненте. Для двумерной матрицы это означает наличие символа τ в первой и последней строках, а также в первом и последнем столбце.

Будем говорить, что фигура F размерности t и размера m определяется в матрице A размерности t и размера n координатами z (в матрице A) по маске M размерности t и размером m, где $z + m - [1] \leq n$, если выполняется условие $(\ M(x) = \tau\ \&\ F(x) \neq \varepsilon\ \&\ F(x) = A(x + z - [1])\ ) \vee (\ M(x) = \varepsilon\ \&\ F(x) = \varepsilon\ )$, и, кроме того, хотя бы одна ячейка $F(x)$ не пуста. Фигура F является матрицей размерности t и размера m, координаты z определяют «начало» фигуры F в матрице A, прозрачные символы маски M – те ячейки, которые должны быть непустыми в матрице и которые становятся ячейками фигуры F, а пустые символы маски M – те ячейки, которые становятся пустыми в F независимо от того, какими они были в матрице. Непустые символы фигуры составляют «содержание» фигуры и располагаются в t-мерном пространстве, а пустые символы заполняют «пропуски» между непустыми символами, если такие пропуски есть. Такую фигуру F будем обозначать $A(z, M)$.

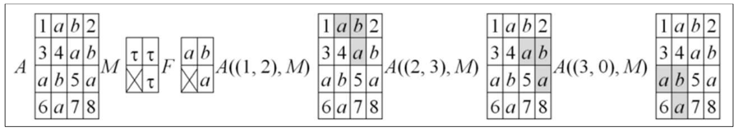

Рис. 2. Пример повторяющейся фигуры
Fig. 2. Example of a repeating figure

Повторяющейся фигурой назовём фигуру F, имеющую более одного вхождения в матрицу A, т.е. существуют маска M и хотя бы две координаты z_1 и z_2 такие, что $F = A(z_1, M) = A(z_2, M)$. На рис. 2 пример двумерной матрицы A, маски M, фигуры F и места фигуры в матрице с указанием координат вхождений.

4. Сдвиг матрицы и число регулярности фигуры

Сдвигом матрицы A размерности t и размера n будем называть её преобразование, задаваемое вектором d размерности t, результатом которого является матрица $d(A)$ размерности t и размера n, определяемая равенствами $d(A)(x) = A(x)$, если $[1] \leq x - d \leq n$ и $A(x) = A(x - d)$, и $d(A)(x) = \varepsilon$ в противном случае. Иными словами, каждая ячейка матрицы с координатами x сдвигается на вектор d, т.е. по каждой координате $i = 1, \dots, t$ сдвигается на $d(i)$ ячеек: i-ая компонента координаты $x(i)$ увеличивается на $d(i)$ (уменьшается на $|d(i)|$, если $d(i) < 0$). Если ячейка не выходит за пределы матрицы и $A(x) = A(x + d)$, то после сдвига в ячейке с координатами $x + d$ будет символ $A(x + d)$, который там и был в A, в противном случае в ячейке будет пустой символ. Ячейки, выходящие за пределы матрицы, исчезают, а освободившиеся ячейки (в которые не перемещаются другие ячейки) заполняются пустым символом. Также пустыми будут ячейки с координатами $x + d$, если $A(x) \neq A(x + d)$. Примеры на рис. 3.

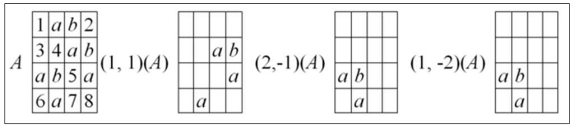

Рис. 3.Примеры сдвига двумерной матрицы
Fig. 3. Examples of two-dimensional matrix shift

Выбираем сдвиги, которые хотя бы одну ячейку матрицы не выводят за её пределы. После этого из двух противоположно направленных сдвигов d и $-d$ выбираем один: тот, который дальше в линейном порядке сдвигов, т.е. d, если $-d <_l d$, и $-d$, если $d <_l -d$. Нулевой сдвиг $[0]$, не меняющий любую матрицу, не выбираем. Множество всех *выбранных* сдвигов обозначим D. Их число, очевидно, равно $(\ (2n(1)-1)*(2n(2)-1)*\dots*(2n(t)-1) - 1\ ) / 2$. Имеем:

$-(n(i) - 1) \leq d(i) \leq (n(i) - 1)$ для $i = 1, \dots, t$;

$d_1 \geq 0$;

если$d_1 = 0$, то $d_2 \geq 0$;

если $d_1 = d_2 = 0$, то $d_3 \geq 0$;

…

если $d_1 = d_2 = \dots = d_{t-1} = 0$, то $d_t \geq 0$.

<u>Утверждение 1</u>. Если в матрице A размерности t и размера n есть два вхождения одной фигуры F с координатами z_1 и z_2 по маске M размерности t и размера m, т.е. $F = A(z_1, M) = A(z_2, M)$, и $z_1 <_l z_2$, то второе вхождение может быть получено из первого выбранным сдвигом матрицы на величину $(z_2 - z_1)$ и затем выделением фигуры с координатами z_2 по маске M: $(z_2 - z_1) \in D$ и $F = ((z_2 - z_1)(A))(z_2, M)$.

Доказательство: Из того, что z_1 и z_2 координаты в A и условия $z_1 <_l z_2$ непосредственно следует, что $(z_2 - z_1) \in D$. По определению сдвига $((z_2 - z_1)(A))(x + z_2 - [1]) = A(x + z_2 - [1] - (z_2 - z_1)) = A(x + z_1 - [1])$ при условии, что 1) $[1] \leq x + z_1 - [1] \leq n$, где x координаты в маске M, т.е. $[1] \leq x \leq m$, и 2) $A(x + z_2 - [1]) = A(x + z_1 - [1])$. Из существования вхождения $A(z_1, M)$ следует выполнение условия 1, а из равенства $A(z_1, M) = A(z_2, M)$ следует выполнение условия 2. Утверждение доказано. □

Опираясь на 0, будем говорить, что фигура F *повторяющаяся при сдвиге* d в матрице A, если она есть в сдвинутой матрице $d(A)$ и, следовательно, есть в A. Фигура F может многократно повторяться при последовательных сдвигах d, т.е. иметь вхождение в каждую из матриц, получающихся последовательным применением сдвига d, т.е. в матрицах $d(A)$, $d(d(A)) = d^2(A)$, … $d(d(\dots(d(A))\dots)) = d^r(A)$. Максимальное число $r > 1$ будем называть *числом вхождений* фигуры F в матрицу A *при сдвиге* d, т.е. фигура F входит в каждую матрицу $d^i(A)$, где $i = 1, 2, \dots, r$, но не входит в матрицу $d^{i+1}(A)$.

Числом регулярности фигуры F по сдвигу d в матрице A назовём произведение sr, где $s \geq 1$ число непустых ячеек в F, а $r > 1$ число вхождений фигуры F в матрицу A при сдвиге d. На рис. 4 пример двумерной матрицы A и двух матриц $d(A)$ и $d^2(A)$ для сдвига $d = (1, 1)$ с указанием местоположения в них двух фигур с числом регулярности $3 = 3*1$ и $2 = 1*2$. Заметим, что в матрице $d(A)$ показано местоположение фигуры из трёх непустых ячеек, которая не максимальна в том смысле, что, добавив ещё одну ячейку с символом a, можно получить фигуру с четырьмя непустыми ячейками.

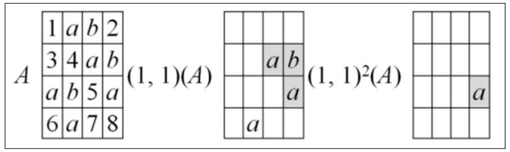

Рис. 4.Примеры фигур, повторяющихся при сдвигах
Fig. 4. Examples of figures repeated during shifts

Повторяющуюся фигуру в матрице A будем называть *максимальной* при сдвиге d, если она имеет максимальное число непустых ячеек среди фигур, повторяющихся при сдвиге d. В примере на рис. 4 при однократном сдвиге (1, 1) максимальная фигура образуется из всех четырёх непустых ячеек матрицы $(1, 1)(A)$.

Поскольку фигура также является матрицей, можно определить вложенность фигур следующим образом: будем говорить, что фигура B *вложена* в фигуру A, если B является фигурой в матрице A.

Утверждение 2. 1) Фигура F максимальная в матрице A при сдвиге d получается из сдвинутой матрицы $d(A)$ удалением пустой «периферии», т.е. повторением, пока возможно, следующей процедуры: если для некоторого $i = 1, \ldots, t$ все ячейки матрицы $d(A)$ с координатами x, где $x(i) = 0$, пусты, то все они удаляются из матрицы. 2) Каждая фигура в матрице A, повторяющаяся при сдвиге d, вложена в фигуру F. 3) Число непустых ячеек фигуры F равно числу непустых ячеек матрицы $d(A)$.

Доказательство. Если ячейка с координатами x матрицы $d(A)$ не пуста, то, во-первых, в этой ячейке в матрице A находится тот же символ, а, во-вторых, этот же символ в матрице A находится в ячейке с координатами $x - d$. Поскольку любая фигура матрицы A, повторяющаяся при сдвиге d, состоит из таких ячеек, отсюда непосредственно следует доказываемое утверждение. □

5. Сумма регулярности матрицы и алгоритм её вычисления

Суммой регулярности матрицы A будем называть сумму $S(A)$ чисел регулярности всех её максимальных фигур, повторяющихся при сдвигах, по всем сдвигам. Из 0 следует, что сумма регулярности матрицы A равна сумме произведений sr по всем d и r, где d выбранный сдвиг, r кратность сдвига d, т.е. число применений одного и того же сдвига d для получения сдвинутой матрицы $d^r(A)$, а s число непустых ячеек в сдвинутой матрице $d^r(A)$. Ниже приведён алгоритм вычисления суммы регулярности матрицы и необходимые вспомогательные процедуры.

```
Алгоритм_1 (A, t, n) /* Вычисление суммы регулярности матрицы */
   Input: матрица A размерности t размера n.
   Output: сумма регулярности S(A).
   S = 0;                          /* нулевая сумма регулярности */
   d = [0]t;                       /* нулевой сдвиг */
   while d <l n - [1]t do          /* цикл по сдвигам */
   |   d = Nextd(d, t, n);                /* вычисление следующего сдвига */
   |   (B, s) = Сдвиг (A, t, n, d);       /* сдвиг матрицы */
```



```
   |   r = 1;                             /* кратность сдвига равна 1 */
   |   while s > 0 do                     /* цикл повторения одного сдвига */
   |   |   S = s*r;                       /* вычисление числа регулярности */
   |   |   (B, s) = Сдвиг (B, t, n, d);   /* дальнейший сдвиг матрицы */
   └   └   r++;                           /* увеличение на 1 кратности сдвига */
   returnS;
Сдвиг (C, t, n, d)       /* сдвиг матрицы */
   Input: матрица C размерности t размера n, сдвиг d.
   Output: сдвинутая матрица D = d(C) и число s непустых ячеек в ней.
   x = [1]t;                  /* координаты начальной ячейки матрицы */
   s = 0;                     /* начальное число s непустых ячеек равно нулю */
   while x <l n do            /* цикл по координатам ячеек матрицы */
   |   if [1]t ≤ x - d ≤ n then        /* если в ячейку сдвигается ячейка матрицы */
   |   |   if C(x) = C(x-d) then       /* если при сдвиге символ не меняется */
   |   |   |   D(x) = C(x);            /* то этот символ – в ячейке сдвинутой матрицы */
   |   |   |   if D(x) ≠ε then         /* если это не пустой символ */
   |   |   |   └   s++;                /* то число s непустых ячеек увеличивается на 1 */
   |   |   else                        /* если при сдвиге символ меняется */
   |   |   └   D(x) = ε;               /* то в ячейке пустой символ */
   |   else                            /* если в ячейка освобождается */
   |   └   D(x) = ε;                   /* то в ячейке пустой символ */
   └   x = Nextx(x, t, n);             /* вычисление координат следующей ячейки */
   return (D, s);             /* когда переберём все ячейки, конец вычисления */
Nextd( d, t, n)      /* вычисление следующего сдвига */
   Input: сдвиг d для матрицы размерности t размера n, [0]t ≤l d <l n - [1]t.
   Output: выбранный сдвиг, следующий за d в линейном порядке сдвигов.
   i = t;                     /* начинаем с последней t-й координаты */
   while do                   /* цикл по координатам i = t, t - 1, ..., 1 */
   |   d(i)++;                         /* увеличение на 1 сдвига по текущей i-й координате */
   |   ifd(i) > n(i) then              /* если выходим за границы матрицы */
   |   |   d(i) = -(n(i) - 1);         /* то минимальный сдвиг по i-й координате */
   |   └   i--;                        /* и переходим к предыдущей (i - 1)-й координате */
   |   else                            /* если не выходим за границы матрицы */
   └   └   returnd;                    /* то конец вычисления */
Nextx(x, t, n)       /* вычисление координат следующей ячейки */
   Input: координаты x для матрицы размерности t размера n, [1]t ≤l x <l n.
   Output: координаты, следующие за x в линейном порядке координат.
   i = t;                     /* начинаем с последней t-й координаты */
   whiledo                    /* цикл по координатам i = t, t - 1, ..., 1 */
   |   x(i)++;                         /* увеличение на 1 текущей i-й координаты */
   |   ifx(i) > n(i) then              /* если выходим за границы матрицы */
   |   |   x(i) = 1;                   /* то начальное значение текущей i-й координаты */
   |   └   i--;                        /* и переходим к предыдущей (i - 1)-й координате */
   |   else                            /* если не выходим за границы матрицы */
   └   └   returnx;                    /* то конец вычисления */
```

Утверждение 3. Алгоритм вычисления суммы регулярности матрицы имеет сложность $\boldsymbol{O}(N^2 n_{max})$, где N число ячеек матрицы, а $n_{max} = max\{n(1), \ldots, n(t)\}$ максимальный размер матрицы по одной из координат.

Доказательство. Число ячеек матрицы $N = n(1) * \ldots * n(t)$. Число выбранных сдвигов d равно $((2n(1)-1)*\ldots*(2n(t)-1) - 1) / 2 = \boldsymbol{O}(N)$. Кратность r сдвига не превышает $n_{max} - 1 = \boldsymbol{O}(n_{max})$. Для каждого сдвига d и его кратности r вычисление сдвинутой матрицы $d^r(A)$ и вычисление числа непустых её ячеек делается за один просмотр ячеек матрицы, т.е. за время $\boldsymbol{O}(N)$. Таким образом, сложность алгоритма $\boldsymbol{O}(N^2 n_{max})$. □

Замечание: Число сдвигов вида d^r, где d выбранный сдвиг, оставляющих в пределах матрицы хотя бы одну ячейку, может быть меньше $n_{max} - 1$, поскольку кратность $n_{max} - 1$ имеет только такой сдвиг d, в котором $|d(i)| = 1$, если $n_i = n_{max}$, и $d(i) = 0$, если $n_i < n_{max}$, $i = 1, \ldots, t$.

6. Коэффициент регулярности матрицы

Сумма регулярности матрицы позволяет корректно сравнивать матрицы одной формы, т.е. имеющих одинаковые размерность, размер и расположение пустых символов. В частности, если выполнить *расширение матрицы*, увеличив максимальные значения некоторых координат $n(i)$, $i = 1, \ldots, t$ (в двумерной матрице это значит добавить строки после последней строки и/или столбцы после последнего столбца), и заполнить новые ячейки пустыми и/или уникальными символами, то сумма регулярности не изменится.

Для сравнения регулярности матриц разного размера и/или с разным числом и/или расположением пустых символов, введём *коэффициент регулярности матрицы* $K(A)$, который определим как процентное отношение суммы регулярности матрицы A к сумме регулярности *самой регулярной* матрицы $R(A)$ того же размера и с тем же числом и расположением пустых символов, что матрица A. Такой самой регулярной матрицей естественно считать матрицу с наибольшей суммой регулярности. Такая наибольшая сумма регулярности будет у матрицы, получаемой из исходной матрицы A заменой всех непустых символов на один и тот же непустой символ. Заметим, что если матрицу A расширить до матрицы B, добавив хотя бы одну непустую ячейку, то сумма регулярности самой регулярной матрицы вырастет: $S(R(B)) > S(R(A))$. Коэффициент регулярности определяется как $K(A) = 100 * S(A) / S(R(A))$.

В качестве примера рассмотрим семь матриц одного размера 3×3 на рис. 5, где матрица G самая регулярная: $G = R(A) = \ldots = R(F)$.

A			*B*			*C*			*D*			*E*			*F*			*G*		
0	1	2	0	0	3	0	1	0	0	1	2	0	1	0	0	1	0	1	1	1
3	4	5	3	1	1	0	1	2	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	1	1
6	7	8	4	5	3	2	2	2	0	1	2	0	1	0	0	1	0	1	1	1

Рис. 5. Пример матриц для вычисления коэффициента регулярности
Fig. 5. Example of matrices for calculating the regularity coefficient

Табл. 1. Подсчёт суммы регулярности и коэффициента регулярности матриц
Table 1. Calculation of the sum of regularity and the coefficient of regularity of matrices

матрица	*r*	сдвиг *d*												*S*	*K*%
		(0, 1)	(0, 2)	(1, 2)	(1, -1)	(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)	(2, -2)	(2, -1)	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)		
A	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2														
B	1	2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	5	10
	2	0													
C	1	2	2	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0	12	23
	2	1			0	0									
D	1	0	0	0	0	6	0	0	0	0	3	0	0	15	29
	2					3									
E	1	0	3	0	4	0	4	0	1	0	3	0	1	20	38
	2				1		1								
F	1	0	3	2	0	6	0	2	1	0	3	0	1	24	46
	2					3									
G	1	6	3	2	4	6	4	2	1	2	3	2	1	52	100
	2	3			1	3	1								

В табл. 1 приведён подсчёт суммы регулярности и коэффициента регулярности всех этих матриц. Обозначения в табл. 1: r – кратность сдвига, S – сумма регулярности, K – коэффициент регулярности. В ячейке таблицы указано число s непустых ячеек в сдвинутой матрице $d^r(X)$, $X = A, \ldots, G$. Ячейка с серым фоном соответствует сдвигу d^r, выводящему все ячейки за пределы матрицы. Ячейка с заштрихованным фоном соответствует сдвигу d^r, оставляющему некоторые ячейки в пределах матрицы, но такому, что в матрице $d^{r-1}(X)$ и, следовательно, в матрице $d^r(X)$, все ячейки пустые.

```
Алгоритм_2 (A, t, n)/* Вычисление коэффициента регулярности матрицы */

   Input: матрица A размерности t размера n.
   Output: коэффициент регулярности K(A) = 100S(A) / S(R(A)).
   S = Алгоритм_1 (A, t, n);      /* сумма регулярности матрицы A*/
                                  /* вычисление самой регулярной матрицы R(A)*/
   x = [1]t;                      /* координаты начальной ячейки матрицы */
   while x <l n do                /* цикл по координатам ячеек матрицы */
   |   if A(x) ≠ ε then              /* если в A ячейка не пуста */
   |   |   R(x) = 1                     /* то пишем в ячейку 1 */
   |   else                          /* если в A ячейка пуста */
   └   └   R(x) = ε;                    /* то пишем в ячейку пустой символ */
   └   x = Nextx(x, t, n);           /* вычисление координат следующей ячейки */
   SR = Алгоритм_1 (R, t, n);     /* сумма регулярности матрицы R(A)*/
   return ( 100 * S / SR );
```

7. Разбиение двумерного представления четырёхмерной матрицы на простые многоугольники повторяющихся фигур

Сумма регулярности и коэффициент регулярности являются обобщёнными числовыми характеристиками регулярности матрицы. Полное описание должно было бы содержать перечисление максимальных фигур, повторяющихся при тех или иных выбранных сдвигах d с указанием числа кратности r сдвига, т.е. троек (сдвиг d, кратность r, максимальная фигура). Однако такое описание не наглядно.

Для наглядного изображения на плоскости повторяющихся фигур четырёхмерной матрицы стихотворения можно использовать описанное в разделе 2 двумерное представление, в котором выделим повторяющиеся фигуры следующим образом. Для каждой ячейки, содержащей иероглиф, определим множество выбранных сдвигов, при которых этот иероглиф сохраняется. Далее удалим границу между каждой парой соседних ячеек (левая-правая или верхняя-нижняя), если эти ячейки 1) содержат иероглифы с одинаковыми множествами сдвигов (в частности, оба иероглифа неповторяющиеся, т.е. с пустыми множествами выбранных сдвигов) или 2) содержат пустые символы.

В результате мы получим разбиение двумерной матрицы на плоские фигуры, ограниченными простыми многоугольниками. Эти фигуры могут быть трёх типов: 1) в ячейках фигуры находятся повторяющиеся (в матрице) иероглифы с одинаковыми множествами сдвигов, 2) в ячейках фигуры находятся уникальные иероглифы, 3) в ячейках фигуры находятся пустые символы. После этого присвоим фигурам первого типа (т.е. содержащим повторяющиеся в матрице иероглифы), номера таким образом, чтобы фигуры с одинаковыми множествами выбранных сдвигов получили одинаковый номер. Очевидно, каждая фигура первого типа содержит попарно различные иероглифы, которые повторяются во всех фигурах с тем же номером и только в них.

Наконец, заменим каждый повторяющийся в матрице иероглиф в ячейке на номер фигуры, в которую входит эта ячейка. Границу стихов и строф по-прежнему будем показывать двойной линией там, где эта граница совпадает с границей многоугольников, и пунктирной линией там, где не совпадает, т.е. проходит внутри многоугольника. На рис. 6 показан пример матрицы стихотворения и её разбиения. В этом примере все иероглифы повторяющиеся, поэтому все они заменены номерами соответствующих фигур в разбиении. В других случаях, в частности, рассматриваемых ниже, это не обязательно так.

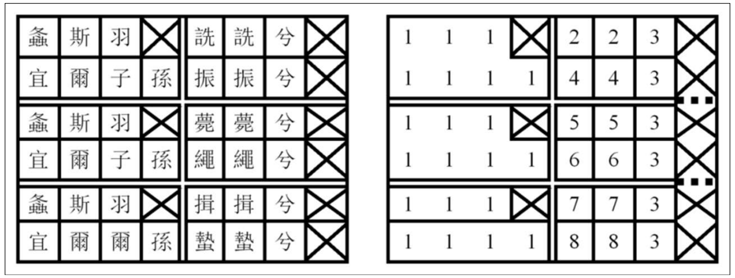

Рис. 6. Стихотворение № 5 (1.1.5): матрица и её разбиение
Fig. 6. Poem No. 5 (1.1.5): the matrix and its partition

8. Результаты компьютерных экспериментов

Для компьютерных экспериментов была составлена программа, реализующая описанные выше алгоритмы. На её вход подавался текст *Ши цзина*, взятый с сайта «Chinese Text Project» [19] в кодировке utf-8 и преобразованный в следующий формат в виде регулярного выражения (не совсем формально, но в интуитивно очевидной форме).

Литералы изображаются жирным шрифтом (иероглифы шрифтом SimSun), *метасимволы* изображаются курсивом (TimesNewRoman). Пробелы и переводы строк используются только для наглядности представления и не являются символами текста. Кроме иероглифов, файл может содержать следующие литералы: **0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 ( ) = . ABCDE.**

Файл_с_текстом_Ши_цзин= *Стихотворение_1*...*Стихотворение_305* **E**

Стихотворение_N= *Заголовок_стихотворения_N Строфа*...*Строфа* **D**

Заголовок_стихотворения_N= **(** ***i*** **,** ***j*** **,** ***k*** **) =** *N* **.** *Z.*

где:

i – номер раздела: от 1 до 4,

j – номер подраздела в разделе: от 1 до 15,

k – номер стихотворения в подразделе: от 1 до 21,

N – глобальный *номер* стихотворения: от 1 до 305,

номер – натуральное число в десятеричной системе счисления:

номер = *цифра*...*цифра*, *цифра* = **0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9,**

Z – текст названия стихотворения, содержащий только иероглифы:

Z = *Иероглиф*... *Иероглиф.*

Пример заголовка стихотворения: **(1,1,1)=1.關雎.**

Строфа= *Строка*... *Строка* **C**

Строка=*Стих*...*Стих* **B**

Стих= *Иероглиф*...*Иероглиф* **A**

Пример строфы:

(1.1.3)=3.卷耳.采采卷耳A不盈頃筐AB嗟我懷人A寘彼周行ABC陟彼崔嵬A我馬虺隤AB我姑酌彼金罍A維以不永懷ABC陟彼高岡A我馬玄黃AB我姑酌彼兕觥A維以不永傷ABC陟彼砠矣A我馬瘏矣A我僕痡矣A云何吁矣ABCD

Файл заканчивается символами **ABCDE**.

С помощью компьютерной программы были посчитаны суммы регулярности и коэффициенты регулярности всех 305 стихотворений *Ши цзина*. В этом разделе дан предварительный анализ полученных результатов, в том числе, в сравнении с оценками параллелизма в стихах *Ши цзина* по трём статьям китайских авторов[20], [21], [22].

Ши цзин подразделяется на 4 раздела: 1) *Гофэн*國風 (Нравы царств), 2) *Сяо я* 小雅 (Малые оды), 3) *Да я* 大雅 (Великие оды) и 4) *Сун* 頌 (Гимны). На рис. 7 (внизу) показан график среднего значения коэффициента регулярности K_{xyzt} (с учётом всех сдвигов) по этим разделам *Ши цзина*, а также его среднее значение 2,71 по всем стихотворениям *Ши цзина*. Он наглядно показывает, как ожидаемо падает регулярность стихотворений от первого к последнему разделам, что обратно росту пафоса этих стихов от народных песен до храмовых песнопений.

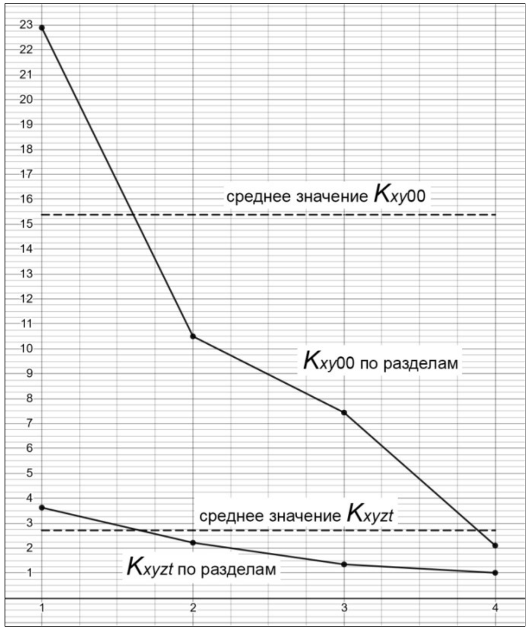

Рис. 7. График коэффициентов регулярности как функция от раздела Ши цзина.
Fig. 7. Graph of regularity coefficients as a function of the Shih-ching section.

В табл. 2 приведены значения коэффициента регулярности (округлённого до второго знака после запятой) для всех 305 стихотворений *Ши цзина*. На рис. 8 (внизу) это же показано в виде графика, где через K_{xyzt} обозначен коэффициент регулярности с учётом сдвигов матрицы стихотворения по всем четырём координатам (строфа, строка в строфе, стих в строке, иероглиф в стихе).

Обратим внимание на пик значения K_{xyzt} = 14,18, который достигается для стихотворения № 8. Это стихотворение упоминается в [22] как экстремально регулярное среди перечисляемых там стихотворений № 4, 6, 7 и 8. Табл. 2 и нижний график на рис. 8 показывают, что оно экстремально среди всех стихотворений *Ши цзина*.

Табл. 2. Коэффициенты регулярности 305 стихотворений Ши цзин
Table 2. Regularity coefficients of 305 Shih-ching poems

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0		2,51	1,06	2,60	6,19	7,26	6,74	5,64	14,18	4,18	1,10	10,19	8,31	4,55	3,44	3,29	7,19	2,65	5,64	4,86
20	5,37	1,93	6,02	1,49	2,59	2,83	1,21	4,77	2,50	2,95	1,85	1,06	1,33	0,90	1,12	0,95	6,03	2,97	1,26	0,98
40	2,82	4,08	1,28	2,90	3,62	2,23	8,04	2,64	5,34	6,34	0,62	1,16	6,43	6,60	1,28	3,61	4,70	0,60	0,66	1,08
60	2,98	3,44	1,16	6,90	7,41	4,07	2,40	2,35	4,93	5,50	4,49	4,73	7,96	1,96	5,60	7,42	3,76	4,62	2,61	2,08
80	3,29	3,65	3,05	2,43	3,08	8,33	4,43	3,23	4,17	1,09	4,86	3,36	2,80	1,72	2,12	2,32	1,64	6,40	6,18	5,94
100	2,82	2,57	2,66	7,26	5,96	3,82	6,19	1,21	4,17	2,50	3,23	4,60	3,90	3,82	3,54	3,26	2,10	3,69	4,53	2,54
120	2,97	3,15	3,49	2,59	2,01	4,96	2,40	0,63	0,44	3,31	2,01	2,40	3,57	4,82	1,99	2,72	3,44	1,02	3,21	6,19
140	2,90	1,65	2,90	8,54	2,87	2,96	3,45	4,54	6,34	2,37	4,47	2,66	4,96	3,87	1,10	1,63	1,87	4,49	2,17	1,38
160	3,08	2,33	1,59	4,65	0,94	0,92	1,56	1,14	0,84	1,64	4,60	4,88	6,59	2,70	2,41	4,83	4,42	0,59	1,27	0,74
180	0,79	1,94	3,99	1,66	1,69	3,93	1,89	3,17	3,00	1,10	1,49	0,68	0,71	0,64	0,49	1,09	0,43	1,04	0,98	1,25
200	1,12	3,00	1,62	0,95	0,35	1,33	5,17	0,80	2,69	0,56	0,78	0,90	0,98	3,10	3,21	1,46	4,77	1,54	0,80	4,21
220	0,79	8,54	1,79	0,57	2,14	2,08	1,25	2,18	3,22	0,94	5,18	8,68	3,51	1,28	1,80	0,95	0,71	0,72	0,90	1,43
240	0,63	0,86	1,21	1,10	2,88	0,91	0,80	1,39	4,77	0,97	1,26	4,03	1,54	3,03	1,01	2,03	0,63	0,46	0,97	1,33
260	1,02	0,67	0,72	1,04	0,96	0,84	0,80	2,12	1,06	1,53	2,19	0,51	1,73	0,42	0,75	0,27	0,50	0,61	0,61	0,33
280	0,42	1,63	0,47	0,61	2,48	0,61	0,87	0,34	0,51	0,25	1,26	0,69	0,59	0,74	0,63	1,28	2,04	3,98	3,27	0,74
300	0,47	0,75	0,42	0,57	0,68	0,52														

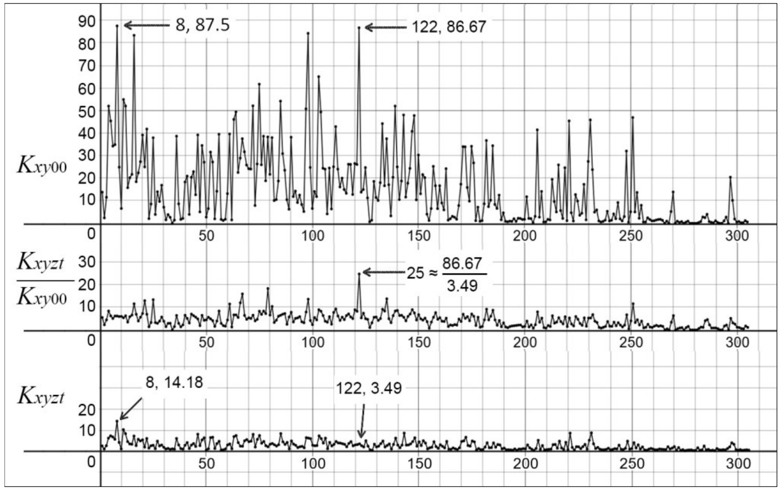

Рис. 8. График двух коэффициентов регулярности и их отношения для 305 стихотворений Ши цзина
Fig. 8. Graph of two regularity coefficients and their relations for 305 Shih-ching poems

На рис. 9 показано разбиение матрицы стихотворения № 8 и перевод А.А. Штукина. Мы видим, что все строки стихотворения № 8 одинаковы, за исключением 3-го иероглифа 2-го стиха. Все эти 6 иероглифов – глаголы, причём 5 из них уникальны. Одинаковость строк означает, что при (ненулевых) сдвигах по вертикали, т.е. по строфам и/или строкам, сохраняются 7 из 8 иероглифов каждой строки. Перевод Штукина довольно точно передаёт этот параллелизм: первые стихи строк одинаковы и содержат по 4 слова, правда, во вторых стихах строк число слов колеблется от 2 до 4 и меняется не только глагол. Но требовать

большего от перевода на русский, наверное, и нельзя: например, в русском языке нет глаголов, которые точно передавали бы значение китайского глагола *цзе* 袺 – поднять полу платья, положить в полу платья, и глагола *се* 襭 – брать (что-л.) в подол, заложив полу платья за пояс. Поэтому приходится использовать несколько слов: в подол набрала, в подоле понесла.

Рис. 9. Разбиение матрицы стихотворения № 8 (1.1.8) Фу и 芣苢 (Подорожник)
Fig. 9. Partition of the matrix of poem No. 8 (1.1.8) Fou yi 芣苢 (Plantain)

Заметим, что при горизонтальных (ненулевых) сдвигах, т.е. по стихам в строках и/или иероглифам в стихах, в стихотворении № 8 не сохраняется ни один иероглиф. Если при вычислении коэффициента регулярности (обозначенного K_{xy00}) учитывать только вертикальные сдвиги, т.е. по строфам и/или строкам, у этого стихотворения № 8 тоже будет максимальный коэффициент регулярности, равный 87,5. График среднего значения K_{xy00} по разделам *Ши цзина* показан на рис. 7 вверху, а по всем 305 стихотврениям – на рис. 8 (вверху), там же (в середине) показан график отношения K_{xy00} / K_{xyzt}. Пик этого отношения достигается для стихотворения № 122 и равен примерно 25 (рис. 10).

Рис. 10. Разбиение матрицы стихотворения № 122 (1.10.9) Цзю му 無衣
(Разве можно сказать)
Fig. 10. Partition of the matrix of poem No. 122 (1.10.9) Wu yi 無衣 (How can it be said)

Стихотворение № 122 имеет K_{xyzt} = 3,49, что выше среднего значения 2,71, но далеко от максимального значения 14,18, это 46-е по величине значение K_{xyzt}. А вот при сдвигах только по вертикали имеем второе после максимального (87,5) значение K_{xy00} = 86,67. В китайских статьях [20], [21], [22] это стихотворение не упоминается.

Тот факт, что K_{xy00} существенно (в несколько раз) больше K_{xyzt} говорит о том, что повторение иероглифов и фигур происходит в основном при вертикальных сдвигах, т.е. по строфам и строкам в строфах, и значительно меньше при горизонтальных сдвигах, т.е. по стихам в строках и иероглифам в стихах. Это подтверждается табл. 3, где указаны средние, максимальные и минимальные значения коэффициентов регулярности для всех 15 видов сдвигов, отличающихся тем, по каким координатам сдвиг не происходит (они обозначены нулями в индексах). Столбцы упорядочены слева направо по убыванию среднего коэффициента регулярности.

Табл. 3. Коэффициенты регулярности(K) при разных видах сдвигов
Table 3. Regularity coefficients (K) for different types of shifts

K	*x*,0, 0,0	*x*,0, *z*,0	*x*,*y*, 0,0	*x*,*y*, *z*,0	*x*,0, 0,*t*	0,*y*, 0,0	0,0, *z*,0	*x*,0, *z*,*t*	0,*y*, *z*,0	*x*,*y*, 0,*t*	*x*,*y*, *z*,*t*	0,*y*, *z*,*t*	0,*y*, 0,*t*	0,0, *z*,*t*	0,0, 0,*t*
average	32,74	17,25	15,38	8,78	6,47	4,91	4,41	4,40	4,26	3,97	2,71	1,59	1,59	1,55	1,25
max	92,82	74,29	87,50	44,93	22,19	87,50	33,33	18,59	29,17	24,14	14,18	8,33	13,10	6,09	7,14
min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0
ст.№8	87,50	46,05	87,50	44,93	21,36	87,50	0	13,43	29,17	24,14	14,18	8,33	13,10	3,17	3,85
ст.№127	1,25	1,32	0,66	0,68	0,49	0	0	1	0	0,29	0,63	0,68	0	1,19	0

В частности, для сдвигов по одной координате имеет место следующее соотношение средних коэффициентов регулярности: $K_{x000}>K_{0y00}>K_{00z0}>K_{000t}$, т.е. повторы случаются чаще всего при сдвиге по строфам, затем по строкам в строфах, затем по стихам в строках и, на последнем месте, по иероглифам в стихах. Эта же тенденция видна из соотношения средних значений коэффициентов регулярности при сдвигах по трём из четырёх координат: $K_{xyz0}>K_{x0zt}>K_{xy0t}>K_{0yzt}$.Наконец, даже минимальный из средних коэффициентов регулярности по вертикальным сдвигам оказывается больше максимального из средних коэффициентов регулярности по горизонтальным сдвигам: $min\{ K_{x000}, K_{xy00}, K_{0y00} \} > max\{ K_{00z0}, K_{00zt}, K_{000t} \}$. Хотя, конечно, для отдельных стихотворений соотношения могут быть другими, в частности, для стихотворения № 8имеем $K_{00z0}= 0 < K_{000t} = 3{,}85$ и$K_{x0zt}= 13{,}43 < K_{xy0t} = 24{,}14$.

Полученные результаты компьютерных экспериментов позволяют также прояснить связь между регулярностью стихотворений и их размером (в числе иероглифов). На рис. 11 показаны коэффициенты регулярности (K_{xyzt}) в зависимости от размера стихотворения, а также средний коэффициент регулярности K_{xyzt}, вычисленный в каждом диапазоне [*x*-50, *x*), как функция числа *x* иероглифов в стихотворении, округлённого до кратности 50. Можно отметить два момента. 1) как и следовало ожидать, средний коэффициент регулярности падает с ростом размера стихотворения, 2) коэффициенты регулярности стихотворений одного размера распределены между минимальным и максимальным значениями более-менее равномерно – им соответствуют столбцы точек на рис. 11.

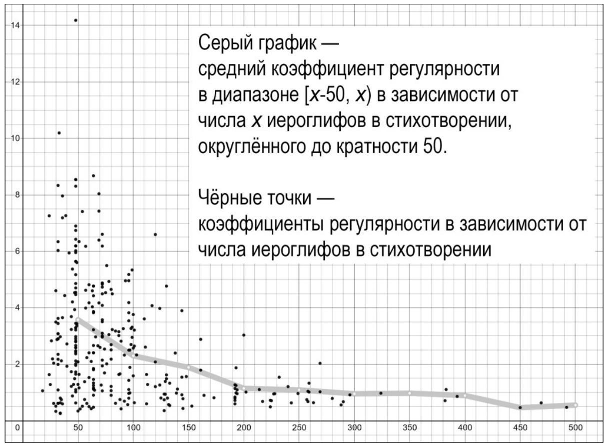

Рис. 11. Коэффициенты регулярности как функция размера стихотворения и график среднего коэффициента регулярности
Fig. 11. Regularity coefficients as a function of the size of the poem and the graph of the average regularity coefficient

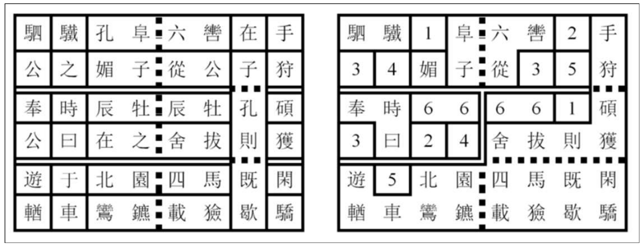

Рис. 12. Стихотворение № 127 (1.11.2) Сы те 駟驖(Князь на охоте): матрица и её разбиение
Fig. 12. Poem No. 127 (1.11.2) Si tie 駟驖 (Prince on the hunt): the matrix and its partition

Для примера можно посмотреть коэффициенты регулярности стихотворений с 48 иероглифами. В *Ши цзине* таких стихотворений больше всего – 40 штук. Максимальный коэффициент регулярности K_{xyzt} = 14,18 имеет отмеченное выше стихотворение № 8, а минимальный коэффициент регулярности K_{xyzt} = 0,63 – стихотворение № 127. Коэффициенты регулярности при всех 15 видах сдвигов для обоих стихотворений приведены внизу табл. 3. Матрица стихотворения № 127 и её разбиение на многоугольники приведены на рис. 12. Это разбиение существенно отличается от разбиения матрицы стихотворения № 8 (рис. 9), прежде всего, обилием уникальных иероглифов.

9. Параллелизмы в оригинале и в переводе

В предыдущем разделе мы уже говорили о сохранении регулярной структуры стихотворения на примере перевода А.А. Штукиным стихотворения № 8 (ПОДОРОЖНИК). Аналогичную структуру имеет и классический перевод на английский Дж. Легга (J. Legge) [19]:

We gather and gather the plantains; // Now we may gather them.
We gather and gather the plantains; // Now we have got them.
We gather and gather the plantains; // Now we pluck the ears.
We gather and gather the plantains; // Now we rub out the seeds.
We gather and gather the plantains; // Now we place the seeds in our skirts.
We gather and gather the plantains; // Now we tuck out skirts under our girdles.

А вот в переводе стихотворения № 122 Дж. Легг в большей мере, чем Штукин, сохранил структуру повторов.

How can it be said that he is without robes? // He has those of the seven orders;
But it is better that he get those robes from you. // That will secure tranquillity and good fortune.
How can it be said that he is without robes ? // He has those of the six orders;
But it is better that he get those robes from you. // That will secure tranquillity and permanence.

Серым фоном выделены уникальные слова, точно соответствующие уникальным иероглифам на рис. 10. Кроме, видимо, неизбежного изменения «теперь – было» во 2 и 6 строках перевода Штукина, появляется отсутствующее в оригинале «Но», а также меняется «Было много – И» и «поверь – что есть». Отчасти это вызвано, наверное, необходимостью соблюсти размер.

При всех нюансах можно отметить стремление обоих переводчиков сохранить регулярную структуру стихотворений, основанную на буквальном повторении знаков (иероглифов – слов). Так не всегда бывает. Но зачем вообще в стихах *Ши цзина* так много повторов? Для чего они нужны? И нужно ли их сохранять при переводе?

В [22] китайский автор пишет о *Ши цзине*: «Если бы эта работа появилась в более позднюю эпоху, когда метрическая поэзия стала популярна, я боюсь, что многие люди посмеялись бы над ней. Написание метрических стихотворений всегда избегало семантических повторений. [В стихосложении] существует так называемая болезнь *хэчжан* 合掌 (болезнь «сложенных ладоней»), в данном случае болезнь парных иероглифов в стихах». И далее: «По сравнению с прозой и романами, длина стихотворений слишком мала. Чтобы максимально расширить смысл текста, поэты не могут не дорожить чернилами, как золотом… Повторение равносильно пустой трате места в стихотворении». И специально по поводу стихотворения № 8 (ПОДОРОЖНИК): «Поэт династии Цин Юань Мэй 袁枚 (1716-1798) посмеялся над этим и сказал: Триста стихов *Ши цзина* подобны множеству подорожников, которые рвут и рвут. Они не предназначены для подражания будущим поколениям». Но далее автор статьи пишет об этой шутке Юань Мэя: «На самом деле он критикует не *Ши цзин*, а тех, кто его читает в цветных очках уставных (пяти- и семисловных) стихов, и это тенденциозный подход». Здесь китайская идиома «цветные очки» – это то же самое, что русские «шоры».

В китайской энциклопедии [23] говорится: «Повторения в строфах и строках относятся к способу выражения в литературных произведениях, в которых одни и те же или похожие предложения неоднократно появляются в одной и той же позиции в разных абзацах. Их роль состоит в том, чтобы углубить впечатление, передать атмосферу, углубить тему стихотворения, усилить музыкальность и чувство ритма стихотворения, чтобы чувства могли быть выражены в полной мере». Профессор Ли Юйлян в [21] добавляет: «Параллелизмы нужны не просто для повторов, а для получения своеобразного художественного эффекта, который заставляет эмоциональное восприятие стихотворения подниматься по спирали. Согласно исследованиям, большинство стихотворений в *Ши цзине* изначально были народными песнями, их пели. При пении эти стихи нужно петь трижды, передавая людям волнующие ощущения и углубляя эмоциональное выражение».

Почему трижды? Во-первых, потому что в *Ши цзине* больше всего стихотворений с тремя строфами (113 из 305, т.е. 37%). Среди стихотворений самого распространённого размера (48 иероглифов – 40 стихотворений) также больше всего трехстрофных (32, т.е. 67%). Во-вторых, три – это важнейшее нумерологическое число, которому должен подчиняться *Ши цзин*, как и любой китайский канон-*цзин*.

Автор статьи [22] поясняет: «Подорожник» – это трудовая песня, которую пели во время сбора диких овощей. И далее сравнивает её с песней Бо Цзюй-и «Вечная печаль», которую пела певичка династии Тан, держа в руках пипу. Эта песня является шедевром с великолепной риторикой и сложным ритмом. Но «Вечная печаль» не подходит для сцены труда по сбору диких овощей, и в этом ценность и рациональность «Подорожника». Тут можно вспомнить о «принципиальной утилитарности китайского искусства» [23], стр. 20-24.

Аналогично стихотворение № 7 (1.1.7) *Ту цзюй* 兔罝 (Охотник) – это песня, которую распевает солдат во время занятий боевыми искусствами. Стихотворения № 5 (1.1.5) *Чжун сы* 螽斯 (Саранча), № 4 (1.1.4) *Цзю му* 樛木 (На юге у дерева долу склоняются ветви) и № 6 (1.1.6) *Тао яо* 桃夭 (Песнь о невесте) – это другой тип сценария: песни для благословения свадьбы. Автор справедливо замечает: это ведь то же самое, что бесконечное “Happy birthday to you” на праздновании дня рождения.

«Нужно ли при переводе сохранять эту риторическую форму параллелизма?» – задаётся вопросом профессор Ли Юйлян в [21] и отвечает: «Это зависит от того, интерпретирует ли переводчик стихи как литературные произведения и признаёт ли он ценность этого художественного приёма». Далее он разбирает пример стихотворения № 143 (1.12.8) *Юэ чу* 月出 (Вышла на небо луна) в его переводах на английский Легга (J. Legge), Дженнингса (W. Jennings), Аллена (C.F.R. Allen) и Эзры Паунда (E. Pound), а также на современный китайский Сюй Юаньчуна (许渊冲).

Эзра Паунд полностью отказался от этой формы риторики. Ли Юйлян цитирует свои собственные слова из статьи «Принцип “реальности” и поэтика имажизма в переводе *Ши цзина* Паунда»: «Принцип имажизма придает его переводу большое художественное очарование имажистской поэзии, и это имеет большое значение для дальнейшего развития и совершенствования его имажистской поэтики». Но далее замечает: «Конечно, с точки зрения

развития самой американской поэзии в таком подходе нет ничего плохого; но с точки зрения культурной коммуникации такой перевод *Ши цзина* очень неэффективен, и он даже вводит читателей в заблуждение и помешает их пониманию классической китайской культуры».

Позиция Аллена демонстрирует, как пишет профессор Ли Юйлян, «другой менталитет, своего рода культурное высокомерие и крайний культурный консерватизм». И приводит высказывание Аллена о переводе Легга: «В глазах современных китайцев перевод Легга очень хорошо соответствует оригинальному тексту и совершенен, но как английское стихотворение он не имеет никакой ценности вообще» ([24],p. XXI). Сам Аллен делал перевод, стараясь, прежде всего, следовать традициям английской поэзии, прежде всего, музыкальности в духе Суинберна. Поэтому он пишет: «Когда произведение состоит из одного предложения, выраженного три или четыре раза с наименьшими возможными вариациями, я часто сжимал его целиком в одну строфу» [там же, p. XXV].

Профессор Ли Юйлян замечает: «Согласно экспертизе, Аллен действительно переписал все строфы с параллелизмами в соответствии с эстетическими стандартами английской поэзии». И далее делает далеко идущие выводы: «Такого рода чрезмерный акцент в переводе на филологических нормах и навязывании таких норм переведенным произведениям является пренебрежением и незнанием литературного разнообразия; ставит литературу перед определенным метафизическим барьером, заставляет ее подчиняться определенному фиксированному шаблону и стирает природу оригинальной культуры. Это уже не литературный акт по своей природе, а акт культурной манипуляции и даже культурный и политический акт. Такого рода культурное высокомерие не редкость. В силу этого, хотя перевод может более или менее вобрать в себя некоторые сильные стороны экзотических культур, в долгосрочной перспективе его культурный консерватизм и узость неизбежно ограничат обмен между двумя культурами и искусствами, препятствуя нормальному развитию собственной культуры. Со второй половины прошлого века положение британской нации продолжало ухудшаться. Может быть, в этом причина?».

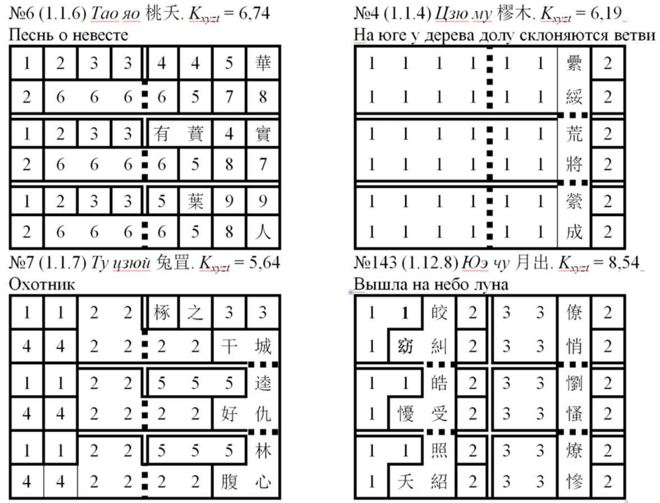

Рис. 13. Разбиения матриц четырёх стихотворений Ши цзина
Fig. 13. Matrix partitions of four Shih-ching poems

На рис. 13 мы приводим разбиения матриц упоминаемых выше стихотворений *Ши цзина* (кроме тех, что приведены выше) для того, чтобы можно было наглядно увидеть степень их регулярности.

10. Заключение

В статье рассматриваются такие регулярности матрицы как повторение фигур, т.е. одинаковые наборы символов с одинаковым относительным расположением. Предложена числовая характеристика регулярности матриц (сумма регулярности), которая позволяет сравнивать матрицы одного размера с одинаковым расположением пустых символов. Для сравнения регулярности матриц разного размера и/или с различным расположением пустых символов предложен коэффициент регулярности как процентное отношение суммы регулярности данной матрицы к сумме регулярности «самой регулярной» матрицы, в которой все непустые ячейки заполнены одним и тем же непустым символом. В статье приведены алгоритмы вычисления суммы и коэффициента регулярности матрицы. По этим алгоритмам реализованы соответствующие компьютерные программы.

Сумма и коэффициент регулярности являются обобщёнными характеристиками регулярности матрицы. Для наглядного представления полной структуры регулярности предложено разбиение матрицы на плоские фигуры, ограниченные простыми многоугольниками. Повторяющиеся фигуры нумеруются так, что вхождения одной повторяющейся фигуры получают одинаковые номера и не содержат одинаковых символов. Другие фигуры состоят либо из сохраняемых уникальных символов, либо из пустых символов.

Компьютерные программы были апробированы для вычисления суммы и коэффициента регулярности всех 305 стихотворений древнекитайского «Канона стихов» – *Ши цзина*. Стихотворение представлялось в виде четырёхмерной матрицы, координаты которой соответствуют строфам, строкам в строфах, стихам в строках и иероглифам в стихах. Некоторые обобщающие результаты этих компьютерных экспериментов приведены в статье, так же, как и примеры разбиения матриц некоторых стихотворений, в том числе, упоминаемых в статьях китайских авторов, посвящённых повторам в стихах *Ши цзина*. Статья также включает раздел, содержащий краткий обзор (по материалам китайских статей) проблемы повторов в *Ши цзине*: предназначение повторов и сохранение или не сохранение их при переводах на другие языки.

Можно предложить следующие направления дальнейших исследований.

1) В статье исследовались повторы при сдвигах матрицы по координатам. Можно провести исследование регулярности при других преобразованиях. Например, совпадение фигур при вращении на кратное 90 число градусов, зеркальная или осевая симметрия и т.п.
2) В статье регулярности основаны только на равенстве символов и фигур символов при повторении. Перспективным представляется рассмотрение других отношений эквивалентности на алфавите символов матриц и/или множестве фигур символов так, что при повторении символ и/или фигура могут меняться, но в пределах того же класса эквивалентности. В частности, это важно для исследования регулярности матричных текстов на русском и других языках, где слова меняются при изменении рода, числа, падежа, времени и т.п.
3) С практической точки зрения было бы интересно проанализировать регулярность матриц других китайских (и не только китайских) стихотворений и других матричных текстов.

Список литературы / References

[1] Рыков С.Ю. Методология науки и философии. Энциклопедия «Духовная культура Китая» в 5 т. М., Восточная литература., 2006–2010 гг. Том 5, Наука, техническая и военная мысль, здравоохранение и образование, 2009 г., стр. 662-668 / Rykov S.Yu. Methodology of science and philosophy. In Encyclopedia «Spiritual Culture of China» in 5 volumes. M., Vostochnaya literatura, 2006-2010. Vol. 5, Science, technical and military thought, health care and education, 2009, pp. 662-668 (in Russian).

[2] Спирин В.С. Построение древнекитайских текстов. М., Наука, 2-е изд., 1976 г., 231 стр. / Spirin V.S. Construction of ancient Chinese texts. M., Nauka, 2nd ed., 1976, 231 p. (in Russian).

[3] Карапетьянц А.М. У истоков китайской словесности. М., Восточная литература, 2010 г., 480 стр. / Karapipants A.M. At the origins of Chinese literature. M., Vostochnaya literatura, 2010, 280 p. (in Russian).

[4] Кобзев А.И. Учение о символах и числах в китайской классической философии. М., 1994 Восточная литература, 432 стр. / Kobzev A. I. The doctrine of symbols and numbers in Chinese classical philosophy. M., Vostochnaya literatura, 1994, 432 p. (in Russian).

[5] Кобзев А.И. Сань у. Энциклопедия «Духовная культура Китая» в 5 т. М., Восточная литература., 2006–2010 гг. Том 5, Наука, техническая и военная мысль, здравоохранение и образование, 2009 г., стр. 803–825. / Kobzev A.I. San U. In Encyclopedia «Spiritual Culture of China» in 5 volumes. M., Vostochnaya literatura, 2006-2010. Vol. 5, Science, technical and military thought, health care and education, 2009, pp. 803–825 (in Russian).

[6] Лихтман В.В. Функция древнекитайских текстов, построенных на десятеричных структурах. В сб. «Дальний Восток и Центральная Азия», М., Наука, 1985 г. / Lichtman V.V. The function of ancient Chinese texts built on ten-meter structures. In Far East and Central Asia, M., Nauka, 1985 (in Russian).

[7] Лихтман В.В. 13-ричные текстологические структуры как план (ту). Труды XVII научной конференции «Общество и государство в Китае», ч. 1, I986, стр. 72-81 / Lichtman V.V. 13-richety textological structures as a plan (TU). In Proc. of the XVII Scientific Conference «Society and the State in China», Part 1, pp. 71-82 (in Russian).

[8] Лихтман В.В. Пространственные текстологические структуры («Шань хай цзина» и «Ши цзина»). Труды XVIII научной конференции «Общество и государство в Китае», ч. 1, I987, стр. 151-154. / Lichtman V.V. Spatial textological structures («Shan Hai Jing» and «Shih-ching»). In Proc. of the XVIII Scientific Conference «Society and the State in China», Part 1, pp. 151-154 (in Russian).

[9] Дорофеева В.В. [Лихтман В.В.] «Ши цзин» как исторический источник для реконструкции пространственных представлений в древнем Китае. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата исторических наук, МГУ им. М. В. Ломоносова, 1992 г., 28 стр. / Dorofeeva V.V. [Likhtman V.V.] “Shih-ching” as a historical source for the reconstruction of spatial representations in ancient China. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Historical Sciences, Lomonosov Moscow State University, 1992, 28 p. (in Russian).

[10] Бурдонов И.Б. Горы и воды: алгебра стихов и гармония перемен. Сборник материалов 21-й конференции из цикла «Григорьевских чтений», 2019 г., стр. 33-58. Также: Геопоэтика гор и вод Канона Стихов. Тезисы докладов 3-й Международной конференции по геопоэтике, 2018. Полный текст: URL: http://burdonov.ru/SHI_ZIN/Geopoetika_gor_i_vod_Shi_Jing/1.html / Burdonov I.B. Mountains and waters: algebra of verses and harmony of changes. Collection of materials of the 21st conference from the cycle of "Grigorievsky Readings", 2019, pp. 33-58. See also: Geopoetics of mountains and waters of the Canon of Poems. Abstracts of the 3rd International Conference on Geopoetics, 2018. Full text: URL: http://burdonov.ru/SHI_ZIN/Geopoetika_gor_i_vod_Shi_Jing/1.html (in Russian).

[11] Кобзев А.И. Старые проблемы и новый перевод «Ши цзина». Общество и государство в Китае, том XLVIII, ч. 2, 2018 г., стр. 261-331 / Kobzev A.I. Old Problems and a New Translation of the Shi Jing. Society and the State in China, vol. XLVIII, part 2, 2018, pp. 261-331 (in Russian).

[12] Кобзев А. И. Юбилей русского перевода «Ши цзина» и нерешённые проблемы. Сборник статей и докладов участников X Международной научно-практической конференции «Россия– Китай: история и культура», 2017 г., стр. 265-274 / Kobzev A. I. The anniversary of the Russian translation “Shih-ching” and unresolved problems. A collection of articles and reports of participants in the X International Scientific and Practical Conference «Russia-China: History and Culture», 2017, pp. 265-274 (in Russian).

[13] Бурдонов И.Б. «Центральное» стихотворение Ши-цзина. Общество и государство в Китае, том XLIX, ч. 2, 2019 г., стр. 311-328 / Burdonov I.B. «Central» poem by Shih-ching. Society and the state in China, vol. XLIX, part 2, 2019, pp. 311-328 (in Russian).

[14] Спирин В.С. Каноны конфуцианства и школы имен. «Великое учение» (Да-сюэ) и «Мудрец Дэн Си» (Дэн Си-цзы). В 2-х томах. М., Восточная литература, 2014 г. Том 2. «Дэн Си-цзы» как логико-гносеологическое произведение. 325 стр. / [14] Spirin V.S. Canons of Confucianism and schools of names. «Great Teaching» (Da-xue) and «Sage Deng Xi» (Deng Xi-tzu). In 2 volumes. M., Vostochnaya literatura, 2014. Vol. 2. «Deng Xi-tzu» as a logical and epistemological work. 325 pp. (in Russian).

[15] Карапетьянц А.М. Раннекитайская системология. М., Восточная литература, 2015 г., 565 стр. / Karapetyants A.M. Early Chinese systemology. M., Vostochnaya literatura, 2015, 565 p. (in Russian).

[16] Кобзев А. И., Орлова Н. А. Поэтика «оборванных строк» (цзюэ-цзюй) и поэтический перевод ста четверостиший Бо Цзюй-и. Общество и государство в Китае, том L, ч. 1, 2020 г., стр. 390–495 /

Kobzev A.I., Orlova N. A. Poetics “quatrain” (jué-jù) and a poetic translation of a hundred quatrains of Bo Zyu-i. Society and the state in China, vol. L, part 1, 2020, pp, 390–495 (in Russian).

[17] Еремеев В.Е. «Книга перемен» и исчисление смыслов. М., Восточная литература, 2013 г., 583 стр. / Yeremeyev V.E. «Book of Changes» and Working out of Meanings. M., Vostochnaya literatura, 2013 (in Russian).

[18] Сторожук А. Г. Слово и цифра: знаковая структура уставных стихов. Вестник СПГУ. Серия 13, вып. 1, 2009 г., стр. 43–67. / Storozhuk A. G. Word and digit: the sign structure of the regular verse. Vestnik of Saint Petersburg University. Series 13, issue 1, 2009, pp. 43–67 (in Russian).

[19] 《詩經 - Book of Poetry》. Chinese Text Project. URL: https://ctext.org/book-of-poetry (дата обращения 06.04.2022).

[20] Чун чжан де чан 重章叠唱 (Параллелизмы в строфах и стихах). Китайская интернет-энциклопедия Байду (Бай-ду бай-кэ 百度百科) / Chong Zhang de Chan 重章 唱 唱 唱 (parallelisms in stanzas and verses). Chinese Internet encyclopedia bydu (bai-do bai-ke). URL: https://baike.baidu.com/item/重章 唱 唱/5093143, accessed 06.04.2022 (in Chinese).

[21] Ли Юйлян 李玉良. «Ши цзин» чжун дэ чун чжан де чан цзици фаньи《诗经》中的重章叠唱及其翻译 (Параллелизмы в строфах и стихах «Канона стихов» и перевод). Из книги «Ши цзин фаньи фаньвэй»《<诗经>翻译探微》(Исследование переводов «Канона Стихов»). / Lee Yulyan 李玉良.《诗经》 中 的 叠唱 及 其 翻译 翻译 (parallelisms in stanzas and verses of the “Classic of Poetry” and translation). From the book《<诗经> 翻译》》 (Study of translations of “Classic of Poetry”). Network discos 调色 盘网. URL: https://www.tspweb.com/key/ 重章 是 什么 手法.html, accessed 06.04.2022 (in Chinese).

[22] Цзинь Гунцзы 晋公子. «Ши цзин» гай цзэньме ду?《诗经》该怎么读? (Как читать «Канон стихов»?). Китайская интернет-энциклопедия Байду (Бай-ду бай-кэ 百度百科) / Jin Gunzi 晋公子《诗经》 该 怎么 读? (How to read the “Classic of Poetry”?). Chinese Internet encyclopedia by Baydu 百度百科 URL: https://baike.baidu.com/tashuo/browse/content?id=52088533ECA6B5EC3AC55555B39 accessed 06.04.2022 (in Chinese).

[23] Энциклопедия «Духовная культура Китая» в 5 т. М., Восточная литература., 2006–2010 гг. Том 6. Дополнительный. Искусство. 1126 стр. / In Encyclopedia «Spiritual Culture of China» in 5 volumes. M., Vostochnaya literatura, 2006-2010. Vol. 6. Supplementary. Art. 1126 pp. (in Russian).

[24] Allen C.F.R. The Book of Chinese Poetry: Being the Collection of Ballads, Sagas, Hymns, and Other Pieces Known as the Shih Ching or Classic of Poetry. L., K. Paul, Trench, Trübner, 1891, 528 p.

Информация об авторах / Information about authors

Игорь Борисович БУРДОНОВ – доктор физико-математических наук, г.н.с. Научные интересы: формальные спецификации, генерация тестов, технология компиляции, системы реального времени, операционные системы, объектно-ориентированное программирование, сетевые протоколы, процессы разработки программного обеспечения.

Igor Borisovich BURDONOV – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Scientist. Research interests: formal specifications, test generation, compilation technology, real-time systems, operating systems, object-oriented programming, network protocols, software development processes.

Алексей Александрович КАРНОВ – аспирант. Научные интересы: формальные спецификации, верификация и тестирование, криптографические интернет-протоколы.

Aleksei Aleksandrovich KARNOV – PhD student. Research interests: formal specifications, verification and testing, cryptographic Internet protocols.