Фризы и цепные дроби

Е. Ю. Смирнов

Памяти Джона Конвея

Аннотация. Записки миникурса, прочитанного на XIX летней школе «Современная математика», Дубна, 18–29 июля 2019 г.

> Фауст: Так пентаграмма этому виной? Но как же, бес, пробрался ты за мной? Каким путем впросак попался? Мефистофель: Изволили её вы плохо начертить, И промежуток в уголку остался, Там, у дверей, — и я свободно мог вскочить. Фауст: Да, случай над тобой удачно посмеялся. Так ты мой пленник, стало быть? Вот удалось негаданно-нежданно!

> > И.-В. Гёте. Фауст. Пер. Н. Холодковского.

Введение

Фризами называются таблицы, заполненные положительными числами в соответствии с некоторым простым правилом. Эти таблицы были впервые определены в 1970-х гг. в работах Д. Кокстера и Дж. Конвея. Оказывается, что, несмотря на простоту их определения, фризы обладают рядом весьма неожиданных свойств. Они оказываются связаны со множеством других математических понятий, в числе которых — триангуляции многоугольников, числа Каталана и Фибоначчи, цепные дроби, ряды Фарея... Кроме того, оказалось, что фризы (так, конечно, тогда еще не называвшиеся) рассматривались еще в работах К.-Ф. Гаусса и Дж. Непера.

В 2000-х гг. интерес к фризам среди математиков существенно вырос в связи с появлением теории кластерных алгебр, основные понятия которой были введены в работах А.В.Зелевинского и С.В. Фомина. Оказалось, что фризы возникают в связи с представлениями колчанов, многообразиями Грассмана, эллиптическими функциями, обобщенными ассоциаэдрами и многими другими сюжетами из современной математики.

В этой брошюре мы начнем с классических вопросов о фризах, рассматривавшихся Кокстером и Конвеем. Этому посвящены первые три главы. В первой главе мы приведем основные определения, сделаем ряд наблюдений о фризах (которые будут доказаны впоследствии), а также расскажем о предыстории вопроса — о том, как фризы появлялись в работах Гаусса и его предшественников.

Вторая глава посвящена феномену целочисленности фризов. Мы покажем, что элементы фриза вычисляются как полиномы с целыми коэффициентами — континуанты — от

Date: 20 июня 2021 г.

элементов начальной строки. В третьей главе мы продолжаем изучение фризов и выводим соотношения на элементы его строк и диагоналей. Основной результат четвертой главы — классификация всех целочисленных фризов. Как будет показано, целочисленные фризы порядка n биективно соответствуют триангуляциям выпуклого n-угольника; при этом все элементы фриза можно восстановить по этой триангуляции с помощью несложного алгоритма.

Пятая и шестая главы посвящены разложениям рациональных чисел в цепные дроби двух видов: «обычные», или положительные, и отрицательные (при определении которых целая часть берется не с недостатком, а с избытком). Мы формулируем свойства цепных дробей на языке матриц второго порядка и в шестой главе устанавливаем связь между двумя типами разложений. Мы также показываем, что разложению рационального числа в цепную дробь отвечает триангуляция многоугольника некоторого специального вида. Оказывается, что по ней можно восстановить различные характеристики этой цепной дроби: подходящие дроби, длину цепной дроби и т.д. Тем самым цепные дроби оказываются связаны с фризами: каждое рациональное число определяет целочисленный фриз с той же триангуляцией.

В седьмой и восьмой главах мы выясним, как эти сюжеты связаны с действием модулярной группы $PSL_2(\mathbb{Z})$ на плоскости Лобачевского. А именно, всякая триангуляция описанного вида может быть получена в качестве подграфа в так называемом графе Фарея — бесконечном графе, вершинами которого являются рациональные точки на абсолюте плоскости Лобачевского, а ребрами — прямые, соединяющие точки p/q и r/s, для которых $ps - qr = \pm 1$. Этот граф сохраняется модулярной группой $PSL_2(\mathbb{Z})$. Мы опишем конструкцию, которая позволяет построить по рациональному числу (или отвечающей ему триангуляции многоугольника) некоторый элемент модулярной группы, явно выраженный через её стандартные образующие. Наконец, мы выясним, как триангуляции (и обобщающие их 3*d*-разрезания) многоугольников связаны с соотношениями на образующие модулярной группы.

Схема зависимости глав выглядит следующим образом:



Читатель, больше интересующийся цепными дробями, вполне может пропустить первые четыре главы и начать с пятой; отсылки к предыдущему тексту в главах 5–6 немногочисленны.

В основу брошюры лег миникурс из трех лекций, прочитанных мною на XIX Летней школе «Современная математика» в Дубне в июле 2019 года. Идея рассказать о фризах возникла у меня в результате общения с В. Ю. Овсиенко и С. Морьер-Жену в ходе летней школы «Теория представлений групп Ли, математическая физика и комбинаторика» (Реймс, Франция) в июне того же года. Кроме того, я использовал материалы своего миникурса о цепных дробях и их связи с модулярной группой, прочитанного на онлайн-школе «Комбинаторика и алгоритмы» в феврале 2021 года. Я благодарен организаторам и слушателям этих школ.

Хочу отметить, что эта брошюра ни в коей мере не претендует на полноту охвата литературы по фризам; для этого рекомендую читателю обратиться к обзорам и специальным статьям по этой тематике. Например, можно начать с замечательного обзора С. Морьер-Жену [4]. Кроме того, подборку ссылок на литературу о фризах и их взаимосвязях с другими областями математики можно найти на домашней странице А. А. Феликсон:

http://www.maths.dur.ac.uk/users/anna.felikson/Projects/frieze/frieze-res.html

Разумеется, вся эта литература написана на английском языке; единственные (кроме этого, а также кроме недавней статьи [13] в «Кванте», примерно совпадающей с первыми главами этой брошюры) русскоязычные тексты о фризах, известные автору — это короткая заметка Мартина Гарднера в его книге «Крестики-нолики» [10, с. 226–228] и статья Джона Конвея в журнале «Квант» [11], содержащая больше вопросов, чем ответов.

Я признателен коллегам, читавшим предварительные версии этой брошюры и высказывавшим свои замечания: В. А. Клепцыну, Г. А. Мерзону, В. Ю. Овсиенко, С. Л. Табачникову, А. А. Феликсон и другим. Особенно ценную обратную связь я получил от А. В. Устинова; от него же я узнал о представлении континуант с помощью кодов Морзе. Наконец, я хочу поблагодарить С. Ю. Бочавер за постоянную поддержку и воодушевление; если бы не она, этот текст вряд ли оказался бы дописан.

11 апреля 2020 года, когда я дописывал первоначальную версию этих записок, на 83-м году жизни скончался Джон Хортон Конвей — один из самых удивительных и неординарных математиков нашего времени. Посвящаю этот текст его памяти.

1. Фризы

1.1. Определение и первые свойства.

Определение 1.1. $\Phi puзом$ порядка *n* называется таблица (t_{ij}) , состоящая из n-1 бесконечной влево и вправо строки положительных чисел, расположенных в шахматном порядке, и удовлетворяющих следующим свойствам:

- Первая и последняя строки состоят из единиц: $t_{1j} = t_{n-1,j} = 1;$
- Унимодулярность: для любых четырех чисел $\begin{array}{c}a\\c\end{array}$ $\begin{array}{c}d\end{array}$ в вершинах единичного ромба $c\end{array}$

верно равенство ad - bc = 1.

Фриз называется целочисленным, если все числа t_{ij} целые.

Пример 1.2. Вот пример целочисленного фриза порядка 7 (такой фриз, как следует из определения, состоит из 6 строк).

| 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| | 2 | | 1 | | 4 | | 2 | | 1 | | 3 | | 2 | | 2 | | 1 | |
| 3 | | 1 | | 3 | | 7 | | 1 | | 2 | | 5 | | 3 | | 1 | | |
| | 1 | | 2 | | 5 | | 3 | | 1 | | 3 | | 7 | | 1 | | 3 | |
| 2 | | 1 | | 3 | | 2 | | 2 | | 1 | | 4 | | 2 | | 2 | | |
| | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | |

Глядя на этот и другие примеры, можно отметить ряд замечательных свойств. Вопервых, такой фриз оказывается периодичным с периодом n — т.е. можно считать его нарисованным на цилиндре. Во-вторых, этот фриз дополнительно обладает скользящей симметрией: если перевернуть его вверх ногами и сдвинуть вбок на три с половиной позиции, он совпадет с исходным.

Наконец, фриз, очевидно, определяется своими первыми двумя строками (единичной и первой нетривиальной) — так вот, почему-то оказывается, что если все элементы второй строки будут целыми числами, то и все остальные элементы фриза являются целыми. Это совершенно неочевидно из определения: из условия унимодулярности для ромбика b

a = d следует, что $c = \frac{ad-1}{b}$, т.е. для вычисления элементов приходится использовать c

деление — и тем не менее, результат этого деления почему-то всегда оказывается целым числом. Наша ближайшая цель — разобраться с этими феноменами.

Интересно также, что если взять «фриз», в первой строке которого стоят единицы, а во второй — произвольные целые положительные числа, и продолжить заполнять его в соответствии с правилом унимодальности, то все последующие числа в таблице окажутся целыми (предлагаем читателю поэкспериментировать с этим самому) — то есть феномен целочисленности имеет место даже для бесконечных «фризов».

Пример 1.3. Рассмотрим таблицу, вся вторая строка которой заполнена двойками. Тогда в третьей строке будут тройки, т.к. $(2 \cdot 2 - 1)/1 = 3$, в четвертой — четвёрки, т.к. $(3 \cdot 3 - 1)/2 = 4$, и так далее: по индукции доказывается, что все значения в *n*-й строке будут равны *n*. Действительно, из закона унимодулярности получаем, что $(n \cdot n - 1)/(n - 1) = (n^2 - 1)/(n - 1) = n + 1$. Ясно, что этот «фриз» будет бесконечным, т.к. элементы в его строках будут возрастать — т.е. никогда, кроме первой строки, не окажутся равными 1.

Замечание 1.4. Иногда бывает полезно формально дополнить фриз сверху и снизу строчками нулей: $t_{0j} = t_{nj} = 0$. Тем самым элементы двух первых и двух последних строк тоже будут включены в ромбики, для которых тривиальным образом будет выполнено условие унимодулярности. 1.2. **Фризы малых порядков.** Посмотрим, как могут быть устроены фризы малых порядков. При n = 3 фриз состоит из двух строк, то есть фриз порядка три единственен:

Далее, фризы порядка 4 имеют вид

Условие унимодулярности равносильно тому, что произведение любых двух элементов во второй строке равняется 2. Поэтому такой фриз имеет вид

| ••• | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| | | a | | b | | a | | b | | |
| | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | |

где ab = 2. В частности, целочисленных фризов порядка 4 будет два: один будет отвечать ситуации, когда a = 2 и b = 1, а другой -a = 1 и b = 2. Среди нецелочисленных фризов отметим такой:

Замечание 1.5. Заметим, что фризы порядка 4 периодичны с периодом 2, а не 4 (а период последнего фриза и вовсе равен 1). Это связано с наличием скользящей симметрии: если перевернуть фриз вверх ногами и сдвинуть на половину периода, он совпадет с исходным.

1.3. **Фризы порядка 5.** Такие фризы удобно восстанавливать не по верхней строке, а по диагонали. Рассмотрим фриз вида

Выразим все его значения последовательно через x и y. Мы получим, что

$$z = \frac{1+y}{x}; \qquad u = \frac{1+z}{y} = \frac{1+x+y}{xy}; \qquad v = \frac{1+u}{z} = \frac{1+x+y+xy}{xy} \cdot \frac{x}{1+y} = \frac{1+x}{y};$$
$$w = \frac{1+v}{u} = \frac{1+x+y}{y} \cdot \frac{xy}{1+x+y} = x; \qquad t = \frac{1+w}{v} = (1+x) \cdot \frac{y}{1+x} = y.$$

Мы опять получили x и y, но уже на другой диагонали. Видим, что фриз опять получается периодичным с периодом 5, и он вновь обладает скользящей симметрией.

Упражнение 1.6. Перечислите все целочисленные фризы порядка 5. Сколько их?

Замечание 1.7. Если, как мы и делали, рассматривать элементы фриза как рациональные функции от x и y, то в знаменателе этих рациональных функций всегда оказывается одночлен. Иными словами, они оказываются многочленами Лорана: многочленами, в которых разрешено использовать и отрицательные целые степени переменных. Поскольку мы зачастую делим вовсе не на одночлен — можно отметить, что «загадочным образом» деление опять-таки всегда происходит нацело, правда, уже в кольце многочленов Лорана. Это наблюдение, известное как феномен Лорана, имеет далеко идущие обобщения в теории кластерных алгебр.

Упражнение 1.8. Выразите элементы фриза порядка 6 через значения на диагонали. Будет ли в этом случае иметь место феномен Лорана?

Упражнение 1.9. Рассмотрим фриз порядка 5, у которого $x = y = \tau$. Покажите, что $\tau = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$, и найдите остальные элементы этого фриза.



Рис. 1.1. Правильный пятиугольник

Последний фриз можно получить из правильного пятиугольника следующим образом. Рассмотрим правильный пятиугольник, все стороны которого равны 1 (рис. 1.1). Пусть его диагональ равна τ . Напомним *теорему Птолемея* из школьного курса планиметрии. Она гласит, что для вписанного четырехугольника *ABCD* верно равенство $AB \cdot CD + AD \cdot BC = AC \cdot BD$. Запишем теорему Птолемея для равнобокой трапеции *ABCD*: в ней AB = BC = CD = 1, а $AD = AC = BD = \tau$. Мы получим уравнение

$$1 \cdot \tau + 1 \cdot 1 = \tau \cdot \tau$$
, r.e. $\tau^2 - \tau - 1 = 0$

Положительный корень этого уравнения как раз равен $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$; это знаменитое золотое сечение.

Упражнение 1.10. Рассмотрим правильный n-угольник со стороной 1 и многократно применим к нему теорему Птолемея. Какой фриз порядка n мы получим? Чему равны элементы в его k-й строке?

1.4. **Pentagramma mirificum.** Впервые фризы порядка 5 появились в связи со сферической тригонометрией в работах Натаниэла Тарпорли¹ и Джона Непера². Дальнейшее развитие они получили в работах Карла-Фридриха Гаусса. Их появление было связано со следующей задачей сферической геометрии.

Рассмотрим пятиконечную звезду на единичной сфере, все углы которой являются прямыми (см. рис. 1.2). В частности, это значит, что точка A' является полюсом для большого круга CD, B' - для DE, и т.д.

Обозначим через α, \ldots, ϵ квадраты тангенсов длин сторон пятиугольника A'B'C'D'E':

$$\alpha = \operatorname{tg}^2 B'E', \quad \beta = \operatorname{tg}^2 E'C', \quad \gamma = \operatorname{tg}^2 A'C', \quad \delta = \operatorname{tg}^2 A'D', \quad \epsilon = \operatorname{tg}^2 D'B'$$

Оказывается, что эти пять величин связаны следующими соотношениями, позволяющими получить по любым двум из них остальные три:

(1.1)
$$1 + \alpha = \gamma \delta;$$
 $1 + \beta = \delta \epsilon;$ $1 + \gamma = \epsilon \alpha;$ $1 + \delta = \alpha \beta;$ $1 + \epsilon = \beta \gamma.$

Упражнение 1.11 (необязательное, для любителей сферической геометрии). Проверьте эти формулы.

Таким образом, эти величины являются элементами следующего фриза порядка 5:

| 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | |
|-------|----------|----------|---------|------------|----------|----------|----------|---------|------------|----------|---|--|
| | α | | β | | γ | | δ | | ϵ | | | |
| | | δ | | ϵ | | α | | β | | γ | | |
| | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | |

¹Nathaniel Tarporley, тж. Torporley (1564–1632). Английский математик, астроном и астролог. Некоторое время работал во Франции секретарем Франсуа Виета.

²John Napier (1550–1617). Шотландский математик. Известен как изобретатель логарифмов и десятичной точки.



Рис. 1.2. Pentagramma mirificum. Справа рисунок из работы Непера, 1614 г.

Упражнение 1.12. Используя соотношения (1.1), окажите следующее равенство (также принадлежащее Гауссу):

$$\alpha\beta\gamma\delta\epsilon = 3 + \alpha + \beta + \gamma + \delta + \epsilon = \sqrt{(1+\alpha)(1+\beta)(1+\gamma)(1+\delta)(1+\epsilon)}.$$

Это равенство в работе Гаусса названо schöne Gleichung, т.е. «красивым тождеством».

В более современных терминах можно сказать, что фризы описывают пространство модулей $\mathcal{M}_{0,5}$ пятерок точек на проективной прямой \mathbb{P}^1 . А именно, рассмотрим пять попарно различных точек z_1, \ldots, z_5 на \mathbb{P}^1 , с точностью до действия группы PGL(2). Для любых четырех из них можно записать их двойное отношение. Пусть

$$u_1 = [z_1 : z_2 : z_3 : z_4] = \frac{(z_3 - z_1)(z_4 - z_2)}{(z_3 - z_2)(z_4 - z_1)}, \quad u_2 = [z_2 : z_3 : z_4 : z_5], \dots$$

и т.д. Таким образом мы получаем пять двойных отношений u_1, \ldots, u_5 . Можно показать, что они удовлетворяют соотношениям, аналогичным (1.1). Тем самым такие пятерки (а значит, и фризы порядка 5) параметризуют пятерки точек на \mathbb{P}^1 с точностью до проективных замен координат. Детали оставляются в качестве упражнения для заинтересованного читателя.

2. Континуанты

2.1. Рекуррентное соотношение. Теперь перейдем к фризам произвольного порядка. Наша ближайшая цель — получить выражение для элементов третьей и последующих строк фриза через элементы второй строки.

Пусть дан фриз со второй строкой ..., a_1, a_2, a_3, \ldots Ясно, что каждый из элементов третьей строки выражается через два элемента второй строки, стоящие непосредственно над ним (слева и справа). Далее, каждый элемент четвертой строки можно найти по правилу унимодулярности уже через *mpu* стоящих над ним элемента второй строки, и так далее. Обозначим элементы третьей строки через a_{12}, a_{23}, \ldots , четвертой через a_{13}, a_{24} , и т.д., как показано ниже:

Нетрудно найти выражение для элементов третьей строки:

 $a_{12} = a_1 a_2 - 1, \qquad a_{23} = a_2 a_3 - 1,$

а из них уже выразить элементы четвертой:

$$a_{13} = (a_{12}a_{23} - 1)/a_2 = a_1a_2a_3 - a_1 - a_3,$$

пятой:

$$a_{14} = (a_{13}a_{24} - 1)/a_{23} = \dots = a_1a_2a_3a_4 - a_1a_2 - a_1a_4 - a_3a_4 + 1$$

шестой:

$$a_{15} = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 - a_1 a_2 a_3 - a_1 a_2 a_5 - a_1 a_4 a_5 - a_3 a_4 a_5 + a_1 + a_3 + a_5$$

(проделайте эти вычисления самостоятельно!).

Внимательно посмотрев на эти выражения, можно заметить закономерность, которой они подчиняются.

2.2. Коды Морзе. Рассмотрим n расположенных в ряд точек, которые занумеруем переменными a_1, \ldots, a_n . Теперь соединим между собой какие-нибудь пары соседних точек, с условием, что каждую точку можно соединить не более чем с одной соседней. Мы получим «код Морзе» из точек и тире: конфигурацию наподобие следующей.

Такой конфигурации сопоставим моном (т.е. одночлен): произведение переменных, которые стоят в *точках*, взятое со знаком «плюс» или «минус» в зависимости от четности числа *тире*. Будем называть этот моном *весом* кода Морзе M и обозначать через w(M). Так, конфигурации с предыдущего рисунка будет отвечать выражение $w(M) = (-1)^2 a_3 a_4 a_7 = a_3 a_4 a_7$.

Пример 2.1. Все коды Морзе и соответствующие им мономы при n от 1 до 5 представлены в таблице 1.

Определение 2.2 (правило Эйлера). Континуантой $V_n(a_1, \ldots, a_n)$ порядка *n* называется сумма одночленов, соответствующих всевозможным кодам Морзе на *n* вершинах.

Замечание 2.3. Положим континуанту нулевого порядка (не зависящую от каких-либо аргументов) равной $V_0 = 1$. Более того, иногда бывает удобно считать, что $V_n = 0$, если n отрицательно.

Таблица 1 позволяет нам вычислить континуанты порядков, не превосходящих 5. Мы видим, что у нас получаются в точности те же выражения, что и для вычисленных в предыдущем параграфе элементов фриза. Вскоре мы докажем это утверждение, но сначала установим еще некоторые свойства континуант. Начнем с рекуррентного соотношения.

Фризы и цепные дроби

| n = 1 | 0 | a_1 | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|--|--|--|--|--|--|
| n=2 | 0 0 | $a_1 a_2$ | | | | | | |
| | 0 — 0 | -1 | | | | | | |
| n = 3 | 0 0 0 | $a_1 a_2 a_3$ | | | | | | |
| | o o—o | $-a_1$ | | | | | | |
| | 0-0 0 | $-a_3$ | | | | | | |
| n = 4 | 0 0 0 0 | $a_1 a_2 a_3 a_4$ | | | | | | |
| | 0 0 0 - 0 | $-a_1a_2$ | | | | | | |
| | $\circ \circ - \circ \circ$ | $-a_1a_4$ | | | | | | |
| | $\circ - \circ \circ \circ$ | $-a_{3}a_{4}$ | | | | | | |
| | $\circ - \circ \circ - \circ$ | 1 | | | | | | |
| n = 5 | 0 0 0 0 0 | $a_1 a_2 a_3 a_4 a_5$ | | | | | | |
| | 0 0 0 0 -0 | $-a_1a_2a_3$ | | | | | | |
| | 0 0 0 - 0 0 | $-a_1a_2a_5$ | | | | | | |
| | 0 0 - 0 0 0 | $-a_1a_4a_5$ | | | | | | |
| | 0-0 0 0 0 | $-a_3a_4a_5$ | | | | | | |
| | 0 0 - 0 0 - 0 | a_1 | | | | | | |
| | 0-0 0 0-0 | a_3 | | | | | | |
| | $\circ - \circ \circ - \circ \circ$ | a_5 | | | | | | |
| Таблица 1. Коды Морзе при $n < 5$ | | | | | | | | |

Предложение 2.4. Континуанты удовлетворяют рекуррентному соотношению

(2.2)
$$V_n(a_1,\ldots,a_n) = a_n V_{n-1}(a_1,\ldots,a_{n-1}) - V_{n-2}(a_1,\ldots,a_{n-2}).$$

Доказательство. Возьмем какой-нибудь код Морзе на *п* вершинах. Посмотрим на его последнюю вершину. Возможны два варианта. Либо ей отвечает точка, и тогда такая конфигурация M соответствует коду Морзе M' на вершинах $1, \ldots, n-1$; при этом w(M) = $a_n w(M')$, поскольку в коде M последняя вершина учитывается, а в конфигурации M' нет. Либо же, напротив, последняя вершина соединена с предпоследней при помощи тире; в таком случае выкинем эти две вершины и обозначим полученный код Морзе на вершинах 1,..., n-2 через M''. Тогда веса кодов M и M'' будут отличаться знаком: w(M) = -w(M'').

Стало быть, все коды, начинающиеся с точки, дадут в континуанту $V_n(a_1, \ldots, a_n)$ вклад, равный $a_n V_{n-1}(a_1, \ldots, a_{n-1})$, а все начинающиеся с тире — вклад, равный $-V_{n-2}(a_1, \ldots, a_{n-2})$. Это и дает нам искомое соотношение (2.2). \square

Дальнейшие свойства континуант мы оставим в качестве упражнения для читателя.

Упражнение 2.5. Докажите следующие равенства:

- (1) $V_n(a_1, \ldots, a_n) = V_n(a_n, \ldots, a_1);$
- (2) $V_n(a_1, \dots, a_{n-1}, 0) = -V_{n-2}(a_1, \dots, a_{n-2});$ (3) $V_n(a_1, \dots, a_n) = a_1 V_{n-1}(a_2, \dots, a_n) V_{n-2}(a_3, \dots, a_n).$

2.3. Соотношение унимодулярности для континуант.

Теорема 2.6. Для любых a_1, \ldots, a_{n+1} имеет место соотношение

$$V_n(a_1,\ldots,a_n)V_n(a_2,\ldots,a_{n+1}) = V_{n-1}(a_2,\ldots,a_n)V_{n+1}(a_1,\ldots,a_{n+1}) + 1.$$

Мы приведем два доказательства этой теоремы, алгебраическое и комбинаторное.

Алгебраическое доказательство. Будем доказывать эту теорему индукцией по п. База, при n = 1, очевидна.

Запишем требуемое соотношение для n и перепишем все члены, в которые входит a_{n+1} , с помощью соотношения (2.2):

$$V_{n+1}(a_1, \dots, a_{n+1}) = a_{n+1}V_n(a_1, \dots, a_n) - V_{n-1}(a_1, \dots, a_{n-1});$$

$$V_n(a_2, \dots, a_{n+1}) = a_{n+1}V_{n-1}(a_2, \dots, a_n) - V_{n-2}(a_2, \dots, a_{n-1}).$$

Тогда равенство перепишется в виде

$$V_n(a_1,\ldots,a_n)(a_{n+1}V_{n-1}(a_2,\ldots,a_n)-V_{n-2}(a_2,\ldots,a_{n-1})) = V_{n-1}(a_2,\ldots,a_n)(a_{n+1}V_n(a_1,\ldots,a_n)-V_{n-1}(a_1,\ldots,a_{n-1})) + 1.$$

В левой и правой части равенства встречается слагаемое $a_{n+1}V_{n-1}(a_2,\ldots,a_n)V_n(a_1,\ldots,a_n)$; взаимоуничтожив их, получим равенство

$$-V_n(a_1,\ldots,a_n)V_{n-2}(a_2,\ldots,a_{n-1}) = -V_{n-1}(a_1,\ldots,a_{n-1})V_{n-1}(a_2,\ldots,a_n) + 1,$$

которое имеет место по предположению индукции. Теорема доказана.

Комбинаторное доказательство. Рассмотрим каждую из континуант в левой части равенства как сумму мономов, отвечающим кодам Морзе на множествах $\{1, ..., n\}$ и $\{2, ..., n+1\}$ соответственно. Будем изображать эти коды Морзе на одном рисунке, только относящиеся к первому коду тире будем изображать пунктирными линиями, а ко второму — сплошными, как показано на рисунке ниже. Поэтому пунктирные тире могут стоять на всех возможных местах, кроме последнего, а сплошные — на всех, кроме первого. Таким образом, левая часть равна сумме мономов, полученным по всевозможным *парам* кодов Морзе с такими условиями.

0 - - - 0 <u>0 - - - 0</u> 0 <u>0 - - - 0</u> 0 <u>0 0 0</u>

Рис. 2.1. Пара кодов Морзе

Сделаем то же для произведения континуант в правой части: каждое произведение мономов из $V_{n-1}(a_2, \ldots, a_n)$ и $V_{n+1}(a_1, \ldots, a_{n+1})$ можно интерпретировать как пару кодов Морзе на множестве $\{1, \ldots, n+1\}$ — причем первый код (будем его обозначать пунктирными тире) не может иметь тире на первой и последней позициях, а на второй (обозначим его сплошными тире) никаких ограничений не накладывается.

Рассмотрим какую-либо конфигурацию (M_1, M_2) , где M_1 и M_2 — коды Морзе на $\{1, \ldots, n\}$ и $\{2, \ldots, n+1\}$ соответственно. Ей отвечает моном $w(M_1)w(M_2)$ из левой части равенства. Построим по ней новую конфигурацию (M'_1, M'_2) , где M'_1 будет кодом Морзе на $\{1, \ldots, n+1\}$, а M'_2 — кодом на $\{2, \ldots, n\}$.

Если между 1 и 2 в коде M_1 нет (пунктирного) тире, то M_1 можно рассматривать как код на вершинах 2,..., n. В то же время код из сплошных тире M_2 можно рассматривать как код на вершинах 1,..., n + 1, у которого на первом месте нет тире. В таком случае положим $(M'_1, M'_2) = (M_1, M_2)$.

Пусть теперь вершины 1 и 2 соединены входящим в код M_1 пунктирным тире. Поскольку в код M_2 входят вершины, начинающиеся со 2-й, то между вершинами 1 и 2 нет сплошного тире. Построим по паре кодов (M_1, M_2) пару кодов (M'_1, M'_2) следующим образом: рассмотрим путь, выходящий из 1-й вершины и состоящий из пунктирных и сплошных тире. Ясно, что они могут только чередоваться. Заменим в нем каждое пунктирное тире на сплошное, а сплошное на пунктирное. Мы получим новую пару кодов (M'_1, M'_2) , у которой на первом месте стоит сплошное тире и нет пунктирного. Эта пара будет иметь тот же вес, что и (M_1, M_2) .

На рис. 2.2 показана пара кодов, которые получаются такой операцией из изображенных на рис. 2.1.

РИС. 2.2. Результат применения инволюции к паре кодов Морзе

При этом пара (M'_1, M'_2) будет «почти всегда» отвечать моному из правой части. Далее, эту процедуру «почти всегда» можно обратить: по «почти» каждой паре кодов (M'_1, M'_2) можно единственным образом восстановить ту пару (M_1, M_2) , по которой она построена, причем веса этих пар будут равны.

Осталось разобраться с тем, что значат слова «почти всегда». Здесь нужно будет рассмотреть два случая: когда *n* четно и когда оно нечетно.

Пусть n четно. Тогда единственная конфигурация (M_1, M_2) , для которой описанная процедура не сработает (т.е. подходящего монома в правой части не найдется), будет иметь следующий вид:

В ней *все* вершины будут соединены чередующимися пунктирными и сплошными тире, причем и первое, и последнее тире будут пунктирными (число вершин четно, значит, число тире между ними нечетно), а вес конфигурации (M_1, M_2) будет равен $(-1)^{n-1} = -1$. Поэтому произведение континуант в левой части равенства будет на 1 меньше, чем произведение континуант в правой части.

Если же, напротив, число вершин нечетно, то у каждой конфигурации (M_1, M_2) будет единственный образ (M'_1, M'_2) — и найдется ровно одна конфигурация из правой части, у которой не будет прообраза. Она изображена ниже:

В таком случае произведение континуант в правой части будет опять-таки на 1 больше, чем произведение континуант в левой части.

2.4. Целочисленность фризов. Из результатов §2.3 немедленно получается следующий результат.

Теорема 2.7. Элемент (n+1)-й строки фриза a_{1n} , над которым во второй строке стоят числа a_1, \ldots, a_n , равняется континуанте $V_n(a_1, \ldots, a_n)$.

Эта теорема объясняет отмеченный нами выше «феномен целочисленности»: все элементы фриза с целочисленной второй строкой $(a_1, a_2, ...)$ оказываются целыми числами, хотя, казалось бы, чтобы их вычислить, приходится совершать деление.

Следствие 2.8. Фриз, элементы второй строки которого являются целыми положительными числами, является целочисленным.

Действительно, континуанта — это многочлен от (a_1, a_2, \dots) с целыми коэффициентами.

2.5. Тождество Эйлера. Теорема из предыдущего раздела допускает обобщение, известное как тождество Эйлера для континуант.

Теорема 2.9. Для любых m, l, n имеет место равенство

$$V_{m+n}(a_1,\ldots,a_{m+n})V_l(a_{m+1},\ldots,a_{m+l}) - V_{m+l}(a_1,\ldots,a_{m+l})V_n(a_{m+1},\ldots,a_{m+n}) + V_{m-1}(a_1,\ldots,a_{m-1})V_{n-l-1}(a_{m+l+2},\ldots,a_{m+n}) = 0.$$

При m = 1 и n = l - 1 это в точности соотношение унимодулярности для континуант.

Мы не будем использовать тождество Эйлера в дальнейшем и приведем его здесь без доказательства. Оно может быть доказано с использованием двойной индукции по двум из трех входящих в него параметров (это оставляется читателю в качестве необязательного упражнения). Короткое и элегантное доказательство этого тождества, принадлежащее А. В. Устинову, можно прочесть в его работе [7].

В оставшихся параграфах этой главы рассказывается о связи континуант с определителями и объясняются некоторые альтернативные способы получения результатов, о которых шла речь выше. Читатель может пропустить эту часть без ущерба для понимания всего остального текста. 2.6. Детерминантное выражение для континуант. Для континуант имеется еще одно полезное выражение: континуанта порядка *n* выражается как определитель трехдиагональной матрицы того же порядка.

Предложение 2.10. Имеет место равенство

$$V_n(a_1,\ldots,a_n) = \begin{vmatrix} a_1 & 1 & 0 & \ldots & 0 & 0\\ 1 & a_2 & 1 & \ldots & 0 & 0\\ 0 & 1 & a_3 & \ldots & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \ldots & a_{n-1} & 1\\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 1 & a_n \end{vmatrix}$$

Доказательство. Докажем это равенство по индукции. База при n = 0 и n = 1 очевидна. А разложив определитель из правой части равенства по последней строке, мы получим в точности рекуррентное соотношение (2.2).

Из этого представления для континуант также можно получить условие унимодулярности. Для этого нам потребуется матричное тождество, известное как *тождество Льюиса Кэрролла*³.

2.7. Тождество Льюиса Кэрролла. Пусть $A = (a_{ij})$ — произвольная матрица порядка n. Обозначим через M ее определитель; кроме того, обозначим через $M_{i_1,\ldots,i_k}^{j_1,\ldots,j_k}$ ее минор порядка n-k, полученный вычеркиванием из A строк с номерами i_1,\ldots,i_k и столбцов с номерами j_1,\ldots,j_k . Тождество Льюиса Кэрролла устанавливает связь между M и минорами порядка n-1 и n-2:

Теорема 2.11 (тождество Льюиса Кэрролла). Имеет место равенство

$$M \cdot M_{1,n}^{1,n} = M_1^1 \cdot M_n^n - M_n^1 \cdot M_1^n.$$

Мы не будем приводить здесь доказательства этого тождества; читатель может придумать его самостоятельно или найти в литературе. Отметим комбинаторное доказательство Д. Зельбергера [8]; оно идейно близко приведенному выше доказательству теоремы 2.6. Оно также воспроизведено в брошюре [14].

2.8. Вычисление континуанты. Вычислим определитель $M = V_n(a_1, \ldots, a_n)$ с помощью тождества Льюиса Кэрролла. Замечательное свойство континуанты состоит в том, что участвующие в тождестве Льюиса Кэрролла миноры будут либо континуантами меньшего порядка, либо единицами:

$$M_1^1 = V_{n-1}(a_2, \dots, a_n);$$
 $M_n^n = V_{n-1}(a_1, \dots, a_{n-1});$ $M_{1,n}^{1,n} = V_{n-2}(a_2, \dots, a_{n-1});$

наконец, M_1^n и M_n^1 равны 1 как верхне- и нижнетреугольная матрица с единицами на диагонали соответственно. Поэтому тождество Льюиса Кэрролла переписывается в виде:

$$V_n(a_1,\ldots,a_n) \cdot V_{n-2}(a_2,\ldots,a_{n-1}) = V_{n-1}(a_1,\ldots,a_{n-1}) \cdot V_{n-1}(a_2,\ldots,a_n) - 1$$

Иначе говоря,

$$(2.3) \quad 1 = V_n(a_1, \dots, a_n) \cdot V_{n-2}(a_2, \dots, a_{n-1}) - V_{n-1}(a_1, \dots, a_{n-1}) \cdot V_{n-1}(a_2, \dots, a_n) = = \begin{vmatrix} V_{n-1}(a_1, \dots, a_{n-1}) & V_{n-2}(a_2, \dots, a_{n-1}) \\ V_n(a_1, \dots, a_n) & V_{n-1}(a_2, \dots, a_n) \end{vmatrix} .$$

Это и есть условие унимодулярности. Мы получили еще одно доказательство теоремы 2.6.

³Lewis Carroll (Charles Lutwidge Dodgson, 1832–1898) — английский математик, писатель и фотограф, автор книг «Алиса в Стране Чудес» и «Алиса в Зазеркалье». Упомянутое тождество использовалось в его работе 1865 г., однако было получено раньше, в работах Деснано и Якоби.

3.1. Соотношения между второй строкой и диагональю. Продолжим рассматривать фриз вида

1 1 1 1 1 a_3 a_4 a_1 a_2 a_{12} a_{23} a_{34} a_{13} . . . a_{24} a_{14} a_{15} . . .

Установим соотношения между элементами его второй строки a_1, a_2, \ldots и элементами диагонали $1, a_1, a_{12}, a_{13}, \ldots$. Мы уже знаем соотношение, выражающее a_{1k} через a_1, \ldots, a_k : это континуанта. Но для континуант выполнено рекуррентное соотношение, приведенное в предложении 2.4. Оно позволяет последовательно находить элементы диагонали фриза, если известна его вторая строка.

Теорема 3.1. Элементы диагонали и верхней строки фриза удовлетворяют соотношению

$$a_{1,k} = a_k a_{1,k-1} - a_{1,k-2}.$$

Замечание 3.2. Иногда говорят, что диагональ фриза $a_1, a_{12}, a_{13}, \ldots$ является решением разностного уравнения Штурма–Лиувилля:

$$V_k = a_k V_{k-1} - V_{k-2},$$

где a_1, a_2, \ldots — коэффициенты, V_1, V_2, \ldots — неизвестные.

Далее, предыдущую теорему можно переформулировать в следующем виде, который позволяет выражать элементы второй строки фриза через элементы его диагонали.

Теорема 3.3. Имеют место равенства

$$a_k = \frac{a_{1,k-2} + a_{1k}}{a_{1,k-1}}.$$

3.2. Симметрии конечного фриза. Теперь предположим, что наш фриз оказался конечным: нашлось такое n, что при всех i выполнены равенства $a_{i,n+i-2} = 1$ и $a_{i,n+i-1} = 0$. Иначе говоря, (n-1)-я строка фриза состоит из одних единиц, а n-я — из одних нулей. Запишем в таком случае теорему 3.1 для элемента $a_{1n} = 0$:

$$0 = a_{1n} = a_n a_{1,n-1} - a_{1,n-2} = a_n - a_{1,n-2}$$

(напомним, что $a_{1,n-1} = 1$, поскольку (n-1)-я строка состоит из одних единиц), откуда

$$a_{1,n-2} = a_n$$

Но то же самое соотношение имеет место для любой диагонали, не только для первой. Получается набор равенств

$$a_{k,n-3+k} = a_{n+k-1}$$

Стало быть, вторая строка фриза совпадает с предпоследней, сдвинутой вправо на n/2 позиций. Сам фриз в таком случае имеет вид



Отсюда получается следующий результат.

Теорема 3.4. Фриз порядка п обладает скользящей симметрией: его k-я строка, сдвинутая на n/2 позиций, совпадает с (n-k)-й строкой.

Доказательство. Из условия унимодулярности получается, что фриз можно строить не от второй строки вниз, а от предпоследней — вверх, и результат будет тем же.

Следствие 3.5. Фриз порядка п является периодичным с периодом п.

Доказательство. Сдвиг фриза на n является результатом применения двух скользящих симметрий со сдвигом на n/2.

Упражнение 3.6. Каким тождествам на континуанты эквивалентна симметричность фриза?

3.3. Бесконечное продолжение конечного фриза. По определению, фриз порядка *n* завершается строкой из единиц и строкой из нулей. То есть для элементов его (скажем, первой) диагонали выполнены равенства

$$a_{1,n-1} = 1, \qquad a_{1,n} = 0.$$

Но что будет, если продолжить эту последовательность дальше? Используя равенство из теоремы 3.1, можно определить $a_{1,i}$ при i > n. Давайте проделаем это:

$$a_{1,n+1} = a_n a_{1,n} - a_{1,n-1} = a_n \cdot 0 - 1 = -1.$$

Далее

$$a_{1,n+2} = a_{n+1}a_{1,n+1} - a_{1,n} = -a_{n+1} = -a_1$$

(здесь мы воспользовались периодичностью второй строки с периодом n). Мы получили, что (n + 1)-й и (n + 2)-й элемент диагонали будут отличаться от первого и второго лишь знаком! Легко видеть, что так будет и дальше: $a_{1,n+k} = -a_{1,k}$ при $k \leq n$. Получается, что диагональ фриза можно продолжить вниз, и следующие n её элементов будут отличаться от первых n умножением на -1. Это же, разумеется, верно и для любой другой диагонали. Аналогично можно сказать, что для произвольного k

$$a_{i,rn+k} = (-1)^r a_{i,k}.$$

Тем самым мы можем продолжить фриз ниже, после строки из нулей. Ясно, что продолжение будет удовлетворять правилу унимодулярности. Возможность продолжать фризы вниз пригодится нам в следующем параграфе.

3.4. **Переход к соседней диагонали.** В этом параграфе мы выясним, как связаны между собой элементы трех соседних диагоналей фриза. Оказывается, что зная две из них, можно восстановить третью с помощью простого матричного преобразования.

Как и раньше, мы будем рассматривать фриз

Чтобы упростить обозначения, будем формально полагать $a_{kk} := a_k$.

Теорема 3.7. Для любого к имеет место равенство

$$\begin{pmatrix} a_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{2k} \\ a_{3k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1k} \\ a_{2k} \end{pmatrix}$$

Неформально говоря, применение такой матрицы сдвигает диагональ фриза, идущую с юго-запада на северо-восток, на одну позицию вниз.

Доказательство. Докажем это равенство индукцией по k. В качестве базы возьмем k = 2:

$$\begin{pmatrix} a_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 a_2 - 1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_2 \end{pmatrix}$$

Заметим, что в качестве базы можно было также взять k = 1, считая, что фриз сверху дополнен нулями; это дало бы верное равенство $\begin{pmatrix} a_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Индуктивный переход. Запишем рекуррентные соотношения на элементы диагоналей:

$$a_{1,k+1} = a_{k+1}a_{1,k} - a_{1,k-1},$$

$$a_{2,k+1} = a_{k+1}a_{2,k} - a_{2,k-1},$$

$$a_{3,k+1} = a_{k+1}a_{3,k} - a_{3,k-1}.$$

Обратите внимание, что во все равенства входит один и тот же коэффициент a_{k+1} . Далее, предположение индукции утверждает, что

$$a_{1,k} = a_1 a_{2,k} - a_{3,k},$$

$$a_{1,k-1} = a_1 a_{2,k-1} - a_{3,k-1}$$

$$a_{1,k+1} = a_1 a_{2,k+1} - a_{3,k+1},$$

Отсюда и получается, что

что и требовалось.

Упражнение 3.8. Выведите эти равенства из предложения 2.10, разложив определитель для континуанты по *первой* строке.

Здесь мы пользовались только рекуррентными соотношениями на элементы диагоналей, так что эти матричные равенства будут верны и для элементов фриза, продолженного вниз в соответствии с правилом из предыдущего параграфа. Отсюда получается следствие, которое пригодится нам в дальнейшем при изучении связи фризов и цепных дробей. Пусть $\begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}$

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
 — единичная матрица размера 2 × 2.

Следствие 3.9. Пусть a_1, \ldots, a_n — вторая строка фриза порядка n. Тогда имеет место матричное равенство

$$\begin{pmatrix} a_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} a_n & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = -I$$

Доказательство. Это следует из теоремы 3.7 и периодичности фриза. Действительно, сдвинув диагональ фриза на n позиций, мы получим ее же, только со знаком «минус» — значит, и композиция матриц в левой части равенства действует умножением на минус единицу.

4. ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ ФРИЗЫ И ТРИАНГУЛЯЦИИ

4.1. Сущность целочисленного фриза. В этой главе мы опишем все фризы, состоящие исключительно из целых элементов.

Будем называть сущностью (quiddity) фриза порядка n его вторую строку (a_1, \ldots, a_n) . Очевидно, она не может содержать двух единиц подряд — это противоречило бы унимодулярности. Однако оказывается, что хотя бы одна единица в этой строке обязательно должна быть.

Предложение 4.1. Вторая строка целочисленного фриза обязательно содержит 1.

Доказательство. Предположим, что это не так, и что найдется фриз, все элементы во второй строке которого отличны от 1: $a_k \ge 2$. Обозначим элементы его первой диагонали через $v_k = a_{1k}$ Тогда для них имеет место неравенство

$$v_k = a_k v_{k-1} - v_{k-2} \ge 2v_{k-1} - v_{k-2},$$

откуда

$$v_k - v_{k-1} \ge v_{k-1} - v_{k-2}$$
.

Но это верно для всех k. Стало быть,

$$v_k - v_{k-1} \ge v_{k-1} - v_{k-2} \ge \dots \ge v_2 - v_1 = a_2 - 1 \ge 1$$

то есть последовательность v_k строго возрастающая. Это противоречит тому, что в какой-то момент она в силу замкнутости фриза должна принять значение 1 (и тем более 0).

Это же утверждение можно доказать и геометрически. Предположим, что мы нашли фриз, для которого все $a_k \ge 2$. Рассмотрим конус $x \ge y \ge 0$, порожденный векторами $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$. Матрица вида $\begin{pmatrix} a_k & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ переводит эти векторы в $\begin{pmatrix} a_k \\ 1 \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} a_k -1 \\ 1 \end{pmatrix}$ соответственно. При $a_k \ge 2$ оба эти вектора переходят внутрь конуса $x \ge y \ge 0$. Значит, и композиция таких матриц $\begin{pmatrix} a_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} a_n & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ переводит этот конус в некоторое его подмножество. Но это противоречит следствию 3.9, которое утверждает, что эта композиция равна -I.

Следующая лемма позволит нам делать из данного целочисленного фриза порядка n новый фриз порядка n + 1.

Лемма 4.2. Пусть $(a_1, \ldots, a_n) - сущность целочисленного фриза порядка <math>n, u \ 1 \le k \le n.$ Тогда:

- (1) набор $(b_1, \ldots, b_{n+1}) = (a_1, \ldots, a_{k-1} + 1, 1, a_k + 1, a_{k+1}, \ldots, a_n)$ является сущностью целочисленного фриза порядка n + 1;
- (2) если $1, v_1, v_2, \ldots, v_{n-2}$ первая диагональ исходного фриза, начинающаяся с элемента $v_1 = a_1$, то соответствующая диагональ нового фриза имеет вид

$$1, v_1, v_2, \ldots, v_{k-1}, v_{k-1} + v_k, v_k, \ldots, v_{n-2}.$$

Доказательство. Начнем с доказательства пункта (2). Посмотрим, как будет устроена первая диагональ нового фриза: обозначим ее через $1, w_1, \ldots, w_{n-1}$.

Ясно, что при $i \leq k-2$ диагонали этих двух фризов совпадают: $w_i = v_i$. При этом на (k-1)-м месте нового фриза будет стоять

$$w_{k-1} = (a_{k-1} + 1)v_{k-2} - v_{k-3} = v_{k-1} + v_{k-2}.$$

Далее,

$$w_k = w_{k-1} - w_{k-2} = v_{k-1} + v_{k-2} - v_{k-2} = v_{k-1}.$$

Следующий элемент диагонали будет равен

$$w_{k+1} = (a_k + 1)w_k - w_{k-1} = (a_k + 1)v_{k-1} - v_{k-1} - v_{k-2} = a_k v_{k-1} - v_{k-2} = v_k.$$

При всех j > k+1 будет иметь место равенство $w_j = v_{j-1}$. В частности, (n-2)-й и (n-1)-й члены этой последовательности будут равны 1 и 0, соответственно, то есть фриз оборвется — а диагональ будет содержать n положительных элементов. То же самое рассуждение применимо и к любой другой диагонали. Стало быть, в результате такой вставки получится целочисленный фриз на единицу большего порядка. Часть (1) также доказана.

Замечание 4.3. Эта конструкция очевидным образом является обратимой: если последовательность $(\ldots, b_{k-1}, 1, b_{k+1}, \ldots)$ — сущность целочисленного фриза, то и $(\ldots, b_{k-1}-1, b_{k+1}-1, \ldots)$ будет сущностью фриза на единицу меньшего порядка (обратите внимание, что в силу отсутствия двух единиц подряд оба числа $b_{k-1} - 1$ и $b_{k+1} - 1$ положительны).

4.2. **Фризы и триангуляции.** Рассмотрим выпуклый *n*-угольник с пронумерованными вершинами. Его *триангуляцией* будем называть его разбиение на треугольники с помощью диагоналей, не пересекающихся нигде, кроме вершин.

Замечание 4.4. Число триангуляций *п*-угольника называется (n-2)-м числом Каталана (это одно из их многочисленных эквивалентных определений). Для них справедлива формула $C(n) = \frac{1}{n-1} {2n-4 \choose n-2}$ (см., например, [12, § 3.3]).

Рассмотрим произвольную триангуляцию *n*-угольника. Ей можно сопоставить набор чисел (c_1, \ldots, c_n) , где c_i — число треугольников, сходящихся в *n*-й вершине. Будем называть такой набор *сущностью триангуляции*. Триангуляция однозначно восстанавливается по своей сущности (почему?).

Теорема 4.5 (Дж. Конвей, Д. Кокстер). *Набор* (c_1, \ldots, c_n) , построенный по триангуляции *n*-угольника, является сущностью некоторого целочисленного фриза порядка n; это отображение устанавливает биекцию между триангуляциями *n*-угольника и целочисленными фризами *n*-го порядка.

Доказательство. Будем доказывать эту теорему по индукции по n. База n = 3 очевидна: имеется лишь одна триангуляция треугольника и единственный фриз 3-го порядка с сущностью (1, 1, 1). (Читатель, которого это не убеждает, может начать с n = 4).

Рассмотрим некоторую триангуляцию n-угольника. Выберем в ней вершину, принадлежащую к единственному треугольнику. Такая существует в силу принципа Дирихле: если n внешних сторон принадлежат n-2 треугольникам триангуляции, то найдётся хотя бы один треугольник (а на самом деле не менее двух), которому принадлежат две внешние стороны. Далее мы будем называть такой треугольник «ухом».

Пусть вершина, принадлежащая единственному треугольнику, имеет номер k, а в вершинах k - 1 и k + 1 сходятся b_{k-1} и b_{k+1} треугольников соответственно. Таким образом, сущность этой триангуляции имеет вид $(\ldots, b_{k-1}, 1, b_{k+1}, \ldots)$. Выбросим треугольник, примыкающий к k-й вершине, из этой триангуляции, получим триангуляцию (n-1)-угольника, сущность которой равна $(\ldots, b_{k-1} - 1, b_{k+1} - 1, \ldots)$. Эта триангуляция, по предположению индукции, определяет фриз с той же сущностью. Но по лемме 4.2, тогда и набор $(\ldots, b_{k-1}, 1, b_{k+1}, \ldots)$ определяет целочисленный фриз.

Биективность полученного соответствия следует из замечания 4.3: из сущности каждого фриза порядка n можно удалить единицу, сведя дело к фризу на единицу меньшего порядка.

4.3. Восстановление фриза по триангуляции. Наша ближайшая цель — описать комбинаторный смысл элементов фриза, получаемого по заданной триангуляции. Теорема Конвея–Кокстера утверждает, что каждый элемент второй строки фриза — это количество треугольников, сходящихся при соответствующей вершине триангуляции. А как восстановить остальные элементы фриза?

Пусть дан целочисленный фриз, который мы будем обозначать в соответствии с формулой (3.5) со с. 14: его вторая строка равна (a_1, a_2, \ldots, a_n) , а через $v_0 = 1, v_1, v_2, \ldots, v_{n-2}$ обозначены элементы диагонали, начинающейся в a_1 , т.е. $v_1 = a_1$. Удобно также считать, что $v_{-1} = 0$. Рассмотрим триангуляцию *n*-угольника, вершины которого пронумерованы числами от 0 до n-1, с сущностью (a_1, \ldots, a_n) . По ней можно восстановить (v_0, v_1, v_2, \ldots) посредством следующего алгоритма:

- напишем в вершинах 0 и 1 числа 0 и 1 соответственно;
- далее расставим числовые отметки во всех остальных вершинах многоугольника по такому правилу: для каждого треугольника, в двух вершинах которого уже стоят числа *a* и *b*, поставим в третьей его вершине число *a* + *b*. Будем повторять эту процедуру до тех пор, пока все вершины не окажутся заполнены.

Упражнение 4.6. Убедитесь, что во всех вершинах, соединенных с нулевой вершиной при помощи диагонали или стороны, будут написаны единицы.

Предложение 4.7. Полученная по этому алгоритму отметка в *i*-й вершине будет равна элементу v_{i-1} диагонали фриза.

Доказательство. Данной триангуляции n-угольника сопоставим двойственный граф на n-2 вершинах: вершины его будут соответствовать треугольникам из триангуляции, причем две вершины будут соединены ребром, если у двух треугольников имеется общая сторона. Такой граф является деревом, валентности всех его вершин не превосходят трех, а висячие вершины отвечают «ушам» триангуляции.



Рис. 4.1. Триангуляция и отвечающее ей дерево

Далее, запись чисел в вершинах треугольников в соответствии с нашим алгоритмом можно рассматривать как обход вершин дерева, отвечающего триангуляции: на первом шаге алгоритма мы берем треугольник, содержащий вершины 0 и 1, и записываем число в его третьей вершине (для первого шага это число будет единицей). Сделав это, отметим отвечающую этому треугольнику вершину дерева как посещенную.

На каждом следующем шаге мы рассматриваем какую-то вершину, смежную с уже посещенными; ей отвечает треугольник, в двух вершинах которого уже стоят какие-то числа. Записав в третьей вершине треугольника их сумму, отметим как посещенную вершину дерева, которая отвечает этому треугольнику.

Докажем наше предложение по индукции по n. База при n = 3 очевидна: мы получаем треугольник, в вершинах которого записаны 0, 1 и 1. Он отвечает единственному фризу порядка 3.

Индуктивный переход: пусть наше предложение доказано для всевозможных триангуляций *n*-угольника, а мы хотим доказать его для (n + 1)-угольника. Посмотрим на последний шаг алгоритма; в его ходе мы обязаны посетить какую-то висячую вершину дерева триангуляции, т.е. добавить к триангуляции *n*-угольника «ухо». Пусть данный *n*-угольник имеет сущность (a_1, \ldots, a_n) , а «ухо» на последнем шаге приклеивается к стороне (k - 1, k). По предположению индукции, построенный в результате выполнения алгоритма набор отметок в вершинах (v_0, \ldots, v_{n-1}) будет стоять на диагонали фриза с сущностью (a_1, \ldots, a_n) . Далее, на последнем шаге между вершинами k-1 и k будет добавлена вершина с отметкой $v_{k-1}+v_k$. При этом триангуляция (n+1)-угольника будет иметь сущность $(\ldots, a_{k-1}+1, 1, a_k+1, \ldots)$ что согласуется с результатом леммы 4.2 об элементах фриза. Предложение доказано. Упражнение 4.8. Рассмотрим триангуляцию *n*-угольника, все диагонали которой образуют зигзаг, как на рис. 4.2 (иными словами, все элементы сущности этой триангуляции не превосходят 3). Докажите, что все элементы соответствующего фриза будут числами Фибоначчи.



Рис. 4.2. Триангуляция при помощи зигзага

Упражнение 4.9. Рассмотрим триангуляцию, в которой имеется вершина, где сходятся не менее 4 треугольников. Докажите, что соответствующий фриз содержит число 4.

4.4. Допустимые пути. Еще один способ вычисления элементов фриза, изложенный в работе [1], основан на подсчете числа так называемых допустимых путей.

Определение 4.10. Допустимым путем из вершины i - 1 в вершину j + 1 называется упорядоченная последовательность попарно различных треугольников τ_i, \ldots, τ_j , где треугольник τ_ℓ инцидентен вершине ℓ .

Предложение 4.11. Элемент фриза a_{ij} равен числу допустимых путей из i - 1 в j + 1.

Мы не будем доказывать это предложение; читатель может попробовать восстановить доказательство сам или прочесть его в работе [1].

Замечание 4.12. Отметим, что путь из (i-1)-й вершины в (i+1)-ю по определению состоит из одного треугольника, проходящего через вершину *i*. Тогда число допустимых путей между этими вершинами есть просто a_i . Далее, путь из (i-1)-й вершины в *i*-ю единственен: он состоит из *нуля* треугольников, поэтому все элементы первой строки фриза равны 1.

Пример 4.13. Рассмотрим следующую триангуляцию семиугольника.



Пусть $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ — входящие в нее треугольники. Перечислим все допустимые пути (τ_1, τ_2) между вершинами 7 и 3. Это будут

 $(\varepsilon,\beta), (\varepsilon,\alpha), (\delta,\beta), (\delta,\alpha), (\gamma,\beta), (\gamma,\alpha), (\beta,\alpha).$

Это дает значение $a_{12} = 7$. (Заметим, что в этом примере $a_1 = 4, a_2 = 2$).

Упражнение 4.14 (нетривиальное). а) Покажите, что допустимый путь как последовательность однозначно восстанавливается по множеству треугольников.

б) Убедитесь, что дополнение к пути из вершины *i* в вершину *j* определяет путь из вершины *j* в вершину *i*. Скажем, для вышеприведенного примера если (τ_1, τ_2) — допустимый путь из 7 в 3, то $\{\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon\} \setminus \{\tau_1, \tau_2\}$ определяет допустимый путь из 3 в 7. Выведите отсюда еще одно доказательство скользящей симметрии фриза.

Замечание 4.15. Большинство результатов из этого раздела можно найти в двух работах Дж. Конвея и Д. Кокстера [2], [3]. Эти работы, опубликованные в двух последовательных номерах посвященного вопросам математического образования журнала *The Mathematical Gazette*, по форме представляют собой привычный ученикам математических классов листок с задачами: в первой статье ряд утверждений о фризах сформулирован в виде последовательности из примерно трех десятков задач, а во второй статье приводятся их решения или достаточно подробные указания.

5. Цепные дроби

В следующих нескольких главах мы увидим, как континуанты, триангуляции многоугольников и фризы возникают в связи с классической задачей о разложении числа в цепную (или, как еще говорят, непрерывную) дробь.

5.1. Подходящие дроби. Пусть дана несократимая дробь p/q, большая единицы. Её можно разложить в цепную дробь следующим образом: выделим целую часть, разделив p на q с остатком. Пусть a_1 — неполное частное, а r — остаток; тогда

$$\frac{p}{q} = a_1 + \frac{r}{q}.$$

Дробь q/r, обратная к r/q, уже будет больше единицы — поэтому из неё можно также выделить целую часть, дробную часть обратить и так далее. На каждом шаге знаменатели дробей будут уменьшаться, поэтому процесс рано или поздно оборвётся (очередная дробь окажется целым числом). Тем самым мы получим представление

$$\frac{r}{s} = a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \frac{1}{\dots + \frac{1}{a_n}}}}.$$

Для краткости мы будем обозначать правую часть через $[a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n]$.

Такое представление почти что однозначно; единственная его неоднозначность состоит в том, что последнее число можно представить либо как a_n , либо как $(a_n - 1) + \frac{1}{1}$. Условимся выбирать одно из этих представлений исходя из того правила, что в разложении рационального числа в цепную дробь всегда должно быть *четное* число компонент.

Пример 5.1. Разложение числа 7/5 в цепную дробь имеет вид

$$\frac{\frac{7}{5}}{5} = 1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1}}} = [1, 2, 1, 1].$$

Предположим, что нам дано разложение числа в цепную дробь: $p/q = [a_1, \ldots, a_n]$. Мы можем рассмотреть не всё это разложение, а лишь часть, образованную первыми *i* его членами: $p_i/q_i = [a_1, \ldots, a_i]$. То, что получится, называется *i*-й подходящей дробью к p/q. Так, например, подходящими дробями к дроби 7/5 из предыдущего примера будут 1, 3/2 и 4/3.

Кстати, отметим, что процедура разложения числа в цепную дробь — это в точности алгоритм Евклида, применённый к числителю и знаменателю изначальной дроби.

5.2. Матрицы цепных дробей. Рассмотрим рациональное число, записанное несократимой дробью p/q > 1. Когда мы раскладываем его в цепную дробь, на каждом шаге мы выделяем из него целую часть (обозначим его через a_1) и обращаем дробную, тем самым получая новую несократимую дробь p'/q'. Посмотрим, как связаны между собой эти числа:

$$\frac{p}{q} = a_1 + \frac{1}{p'/q'}; \qquad \frac{p}{q} = \frac{a_1 p' + q'}{p_1}.$$

Отсюда мы можем записать равенства

$$p = a_1 p' + q';$$

$$q = p'.$$

Заметьте, что здесь мы воспользовались несократимостью дробей p/q и p'/q'.

Стало быть, числа p и q получаются из p' и q' линейной заменой, матрицу которой нетрудно выписать:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p' \\ q' \end{pmatrix}.$$

Далее ту же процедуру можно повторить, выделив целую часть a_2 из дроби p'/q'; мы получим новую дробь p''/q'', что даст нам равенство

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p'' \\ q'' \end{pmatrix}$$

Этот процесс завершится, когда очередная дробь $p^{(n-1)}/q^{(n-1)}$ окажется целым числом a_n , что равносильно тому, что $p^{(n-1)} = a_n$ и $q^{(n-1)} = 1$. Мы получим равенство

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} a_{n-1} & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Можно также «выделить дробную часть» из целого числа a_n , получив «дробь» $p^{(n)}/q^{(n)} = 1/0$. Рационального числа 1/0, конечно же, не бывает, однако на уровне матриц всё будет хорошо:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} a_{n-1} & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

А что же будет, если применить то же произведение матриц не к вектору $\begin{pmatrix} 1\\ 0 \end{pmatrix}$, а к другому базисному вектору, $\begin{pmatrix} 0\\ 1 \end{pmatrix}$? Мы получим равенство

$$\begin{pmatrix} r\\s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 1\\1 & 0 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} a_{n-1} & 1\\1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n & 1\\1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0\\1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 1\\1 & 0 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} a_{n-1} & 1\\1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1\\0 \end{pmatrix}.$$

Мы представили вектор с компонентами r и s как произведение матриц вида $\begin{pmatrix} a_i & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, только для набора (a_1, \ldots, a_{n-1}) , а не для (a_1, \ldots, a_n) . Отсюда следует, что r/s равняется последней подходящей дроби p_{n-1}/q_{n-1} к числу p/q:

$$p/q = [a_1, \dots, a_n];$$
 $r/s = [a_1, \dots, a_{n-1}].$

Определение 5.2. *Матрицей цепной дроби* для числа $p/q = [a_1, \ldots, a_n], p/q > 1$, называется матрица

$$M^+(a_1,\ldots,a_n) = \begin{pmatrix} a_1 & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} a_n & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Мы получили следующее предложение.

Предложение 5.3. Пусть $M^+(a_1, \ldots, a_{2m})$ — матрица цепной дроби для числа p/q, а $r/s = p_{2m-1}/q_{2m-1}$ — последняя подходящая дробь к p/q. Тогда

$$M^+(a_1,\ldots,a_{2m}) = \begin{pmatrix} p & r \\ q & s \end{pmatrix}$$

То же можно сказать и про любую пару соседних подходящих дробей, не обязательно последнюю.

Следствие 5.4. Пусть p_{i-1}/q_{i-1} и p_i/q_i — соответственно (i-1)-я и *i*-я подходящие дроби $\kappa p/q = [a_1, \ldots, a_n]$. Тогда

(5.6)
$$\begin{pmatrix} p_i & p_{i-1} \\ q_i & q_{i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} a_i & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Из этого утверждения моментально получаются следующие свойства подходящих дробей.

Предложение 5.5. Числители и знаменатели подходящих дробей $p_i/q_i = [a_1, \ldots, a_i]$ к дроби $p/q = [a_1, \ldots, a_n]$ удовлетворяют следующим равенствам:

- (1) $p_i q_{i-1} p_{i-1} q_i = (-1)^i$;
- (2) p_i и q_i взаимно просты;
- (3) для p_i и q_i выполнены рекуррентные соотношения $p_k = a_i p_{i-1} + p_{i-2}$ и $q_i = a_i q_{i-1} + q_{i-2}$ с начальными условиями $p_0 = 1$, $p_1 = a_1$, $q_0 = 0$, $q_1 = 1$;
- (4) последовательности числителей и знаменателей подходящих дробей возрастают: $p_{i-1} < p_i \ u \ q_{i-1} < q_i \ dля \ любого \ i.$

Доказательство. (1) Заметим, что определитель матрицы вида $\begin{pmatrix} a & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ равен -1. Следовательно,

$$\det \begin{pmatrix} p_i & p_{i-1} \\ q_i & q_{i-1} \end{pmatrix} = (-1)^i.$$

В частности, если считать количество компонент разложения чётным, мы получаем равенство det $M^+(a_1, \ldots, a_{2m}) = 1$.

- (2) Это непосредственно следует из (1).
- (3) Выделим в произведении в правой части равенства (5.6) последний сомножитель:

$$\begin{pmatrix} p_i & p_{i-1} \\ q_i & q_{i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{i-1} & p_{i-2} \\ q_{i-1} & q_{i-2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_i & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

При i = 1 мы получаем равенство

$$\begin{pmatrix} p_1 & p_0 \\ q_1 & q_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

что даёт нам начальные условия. При произвольном k равенство первых столбцов этих матриц в точности соответствует рекуррентным соотношениям.

Утверждение (4) следует из (3), поскольку все a_i строго положительны.

Замечание 5.6. Разумеется, все перечисленные свойства подходящих дробей можно доказать и не прибегая к матричному языку. Читатель может проделать это самостоятельно или прочесть, например, в классической книге А. Я. Хинчина «Цепные дроби» [15]. Геометрическая интерпретация действия таких матриц на плоскости — это алгоритм «вытягивания носов», о котором написано в замечательной брошюре В. И. Арнольда [9]. Её мы также горячо рекомендуем всем интересующимся.

5.3. Снова континуанты. Мы видим, что соотношение (3) из предложения 5.5 очень похоже на рекуррентное соотношение для континуант (предложение 2.4): они отличаются только знаком. Поэтому можно определить положительные континуанты при помощи соотношения $K_0(\cdot) = 1$, $K_1(a_1) = a_1$, $K_i(a_1, \ldots, a_i) = a_i K_{i-1}(a_1, \ldots, a_{i-1}) + K_{i-2}(a_1, \ldots, a_{i-2})$.

Упражнение 5.7. Сформулируйте и докажите аналоги правила Эйлера (определение 2.2) и свойств из упражнения 2.5 для положительных континуант и проинтерпретируйте (аналогично предложению 2.10) их в терминах разложения определителей по строке или столбцу.

Тогда предложение 5.5 (3) принимает следующий вид:

Следствие 5.8. *i-я* подходящая дробь к дроби $p/q = [a_1, \ldots, a_{2m}]$ равняется отношению континуант

$$\frac{p_i}{q_i} = \frac{K_i(a_1, \dots, a_i)}{K_{i-1}(a_1, \dots, a_{i-1})}$$

причем дробь в правой части равенства несократима.

5.4. **Отрицательные цепные дроби.** При определении цепной дроби мы брали целую часть числа с недостатком. А что будет, если выделять целую часть, но с избытком, и потом применять ту же процедуру к разности между ней и исходным числом? У нас возникнет

разложение числа в отрицательную цепную дробь; иногда её также называют цепной дробью Хирцебруха⁴. Если будет нужно избежать путаницы, «обычную» цепную дробь мы будем называть положительной цепной дробью.

При этом все компоненты отрицательной цепной дроби для числа, большего 1, будут натуральными числами, не меньшими 2; такое разложение уже будет однозначно. Будем обозначать его двойными квадратными скобками.

$$\frac{p}{q} = c_1 - \frac{1}{c_2 - \frac{1}{c_3 - \frac{1}{\dots}}} = [[c_1, c_2, c_3 \dots]].$$

Пример 5.9. Число 7/5 раскладывается в отрицательную цепную дробь так:

$$\frac{7}{5} = 2 - \frac{1}{2 - \frac{1}{3}} = [[2, 2, 3]]$$

Для отрицательных цепных дробей так же определяются подходящие дроби, которые мы будем обозначать \tilde{p}_i/\tilde{q}_i . Они получаются, если ограничиться в разложении в цепную дробь первыми *i* членами: $\tilde{p}_i/\tilde{q}_i = [[c_1, \ldots, c_i]]$. Например, для 7/5 подходящие дроби будут равны 2/1 и 3/2.

Аналогично можно определить и матрицы цепных дробей. Пусть p/q — исходная дробь, а дробь \tilde{p}/\tilde{q} получается из неё вычитанием целой части с избытком, переменой знака и взятием обратного. Так, поскольку

$$\frac{p}{q} = c_1 - \frac{1}{\tilde{p}/\tilde{q}} = \frac{c_1 \tilde{p} - \tilde{q}}{\tilde{p}},$$

то переход между предыдущей и следующей цепными дробями осуществляется так:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{pmatrix}.$$

Теперь можно дать определение матрицы отрицательной цепной дроби и доказать следующее предложение, аналогичное предложению 5.3.

Определение 5.10. Матрицей отрицательной цепной дроби для числа $p/q = [[c_1, \ldots, c_k]], p/q > 1$, называется матрица

$$M(c_1,\ldots,c_k) = \begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} c_k & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Замечание 5.11. Одно из преимуществ работы с матрицами состоит в том, что матрицы $M(c_1, \ldots, c_k)$ оказываются более «универсальными», чем цепные дроби: они определены для любой последовательности коэффициентов, тогда как для цепных дробей это не так, т.к. некоторые знаменатели могут обращаться в нуль. В качестве примера рассмотрим следующую «цепную дробь»:

$$[[3,1,2,1]] = 3 - \frac{1}{1 - \frac{1}{2 - \frac{1}{1}}}.$$

Она не соответствует никакому рациональному числу, тогда как матрица M(3, 1, 2, 1) оказывается определена (вычислите её!).

⁴Friedrich Hirzebruch (1927–2012) — немецкий математик, один из основателей Математического института им. Макса Планка в Бонне.

Предложение 5.12. Пусть $M(c_1, ..., c_k)$ — матрица цепной дроби для числа p/q, а $\tilde{r}/\tilde{s} = \tilde{p}_{k-1}/\tilde{q}_{k-1}$ — последняя подходящая дробь к p/q. Тогда

$$M(c_1,\ldots,c_k) = \begin{pmatrix} p & -\tilde{r} \\ q & -\tilde{s} \end{pmatrix}$$

Отсюда немедленно получается выражение для матриц подходящих дробей.

Следствие 5.13. Пусть $\tilde{p}_{i-1}/\tilde{q}_{i-1}$ и \tilde{p}_i/\tilde{q}_i — соответственно (i-1)-я и i-я отрицательные подходящие дроби к $p/q = [[c_1, \ldots, c_k]]$. Тогда

(5.7)
$$\begin{pmatrix} \tilde{p}_i & \tilde{p}_{i-1} \\ \tilde{q}_i & \tilde{q}_{i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} c_i & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Тем самым для отрицательных подходящих дробей имеется аналог предложения 5.5.

Предложение 5.14. Числители и знаменатели отрицательных подходящих дробей $\tilde{p}_i/\tilde{q}_i = [[c_1, \ldots, c_i]]$ к дроби $p/q = [[c_1, \ldots, c_k]]$ удовлетворяют следующим равенствам:

- (1) $\tilde{p}_i \tilde{q}_{i-1} \tilde{p}_{i-1} \tilde{q}_i = 1;$
- (2) \tilde{p}_i и \tilde{q}_i взаимно просты;
- (3) для \tilde{p}_i и \tilde{q}_i выполнены рекуррентные соотношения $\tilde{p}_i = c_i \tilde{p}_{i-1} \tilde{p}_{i-2}$ и $\tilde{q}_i = c_i \tilde{q}_{i-1} \tilde{q}_{i-2}$ с начальными условиями $\tilde{p}_0 = 1$, $\tilde{p}_1 = c_1$, $\tilde{q}_0 = 0$, $\tilde{q}_1 = 1$;
- (4) последовательности числителей и знаменателей отрицательных подходящих дробей возрастают: $\tilde{p}_{i-1} < \tilde{p}_i$ и $\tilde{q}_{i-1} < \tilde{q}_i$ для любого *i*.

Доказательство. Эти утверждения доказываются аналогично положительному случаю. Более того, здесь ситуация будет даже проще: матрицы вида $\begin{pmatrix} c & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ всегда будут иметь определитель 1.

Единственное небольшое отличие состоит в доказательстве п. (4). Это утверждение опятьтаки будет следовать из рекуррентного соотношения (3). Докажем его по индукции. База очевидна. Предположение: пусть мы знаем, что $\tilde{p}_{i-1} > \tilde{p}_{i-2}$. Запишем выражение для \tilde{p}_i и воспользуемся неравенством $c_i \geq 2$:

$$\tilde{p}_i = c_i \tilde{p}_{i-1} - \tilde{p}_{i-2} \ge 2\tilde{p}_{i-1} - \tilde{p}_{i-2} = \tilde{p}_{i-1} + (\tilde{p}_{i-1} - \tilde{p}_{i-2}) \ge \tilde{p}_{i-1},$$

что и требовалось. Аналогично и для \tilde{q}_i .

Здесь мы видим связь разложений в цепную дробь с фризами: числители и знаменатели подходящих дробей преобразуются ровно по тем же рекуррентным правилам, что элементы фризов. Например, они получаются как отношения континуант.

Предложение 5.15. Пусть $p/q = [[c_1, ..., c_k]] - разложение рационального числа в отри$ цательную цепную дробь. Тогда*i* $-я подходящая дробь <math>\tilde{p}_i/\tilde{q}_i = [[c_1, ..., c_i]]$ для p/q равняется отношению континуант

$$\frac{\tilde{p}_i}{\tilde{q}_i} = \frac{V_i(c_1,\ldots,c_i)}{V_{i-1}(c_1,\ldots,c_{i-1})},$$

причем дробь в правой части несократима.

Это доказывается точно так же, как в случае положительных цепных дробей.

5.5. Связь между матрицами разложений в положительную и отрицательную цепную дробь. Мы описали два способа раскладывать рациональное число p/q в цепную дробь: положительную $p/q = [a_1, \ldots, a_{2m}]$ и отрицательную $p/q = [[c_1, \ldots, c_k]]$. По каждому из этих разложений мы построили матрицу: $M^+ = M^+(a_1, \ldots, a_{2m})$ и $M = M(c_1, \ldots, c_k)$ соответственно.

Пример 5.16. Выбрав p/q = 7/5, мы получаем, что

$$M^+(1,2,1,1) = \begin{pmatrix} 7 & 4 \\ 5 & 3 \end{pmatrix}, \qquad M(2,2,3) = \begin{pmatrix} 7 & -3 \\ 5 & -2 \end{pmatrix}.$$

Возникает вопрос: а как эти матрицы связаны между собой? Эта связь оказывается очень простой: их первые столбцы будут одинаковы и равны разности между вторыми столбцами матриц M^+ и M. На матричном языке это формулируется так.

Предложение 5.17. Пусть M^+ и M — соответственно матрицы положительной и отрицательной цепной дроби для числа p/q. Тогда

$$M^+ = M \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Доказательство. В силу предложения 5.5 матрица M^+ равна $\begin{pmatrix} p & r \\ q & s \end{pmatrix}$, где r/s — последняя положительная подходящая дробь к p/q. Аналогично предложение 5.14 утверждает, что $M = \begin{pmatrix} p & -\tilde{r} \\ q & -\tilde{s} \end{pmatrix}$, где \tilde{r}/\tilde{s} — последняя отрицательная подходящая дробь. Тем самым первые столбцы матриц M^+ и M равны, а требуемое равенство равносильно утверждению о том, что $r + \tilde{r} = p$ и $s + \tilde{s} = q$.

Докажем эти равенства. Воспользуемся свойством унимодулярности для подходящих дробей. Мы знаем, что

$$\tilde{r}q - \tilde{s}p = 1$$

С другой стороны,

$$rq - sp = -1.$$

Знак «минус» возникает, т.к. последняя подходящая дробь имеет нечетный номер — по нашему определению, количество компонент в разложении числа в положительную цепную дробь четно. Таким образом,

$$(r+\tilde{r})q - (s+\tilde{s})p = 0.$$

Но из неравенств на числители и знаменатели подходящих дробей мы знаем, что r < p и $\tilde{r} < p$, а также s < q и $\tilde{s} < q$. Значит, $0 < r + \tilde{r} < 2p$ и $0 < s + \tilde{s} < 2q$. Следовательно, $r + \tilde{r} = p$ и $s + \tilde{s} = q$, что и требовалось.

6. Матрицы цепных дробей и группа $SL_2(\mathbb{Z})$

6.1. Связь между положительными и отрицательными цепными дробями. В предыдущем параграфе мы выяснили, как связаны между собой матрицы положительной и отрицательной цепной дроби. Эта глава посвящена ответу на другой вопрос: предположим, что дробь p/q имеет «положительное» разложение $[a_1, \ldots, a_{2m}]$ и «отрицательное» $[[c_1, \ldots, c_k]]$. Как связаны между собой эти наборы чисел? Иначе говоря, как восстановить один из этих наборов, зная другой? Ясно, что проще всего по одному из разложений вычислить саму дробь, а потом разложить её другим способом — но есть ли более прямая связь? Ответ на этот вопрос даётся следующей теоремой.

Теорема 6.1. Пусть рациональное число p/q > 1 имеет разложения в положительную и отрицательную цепную дробь $[a_1, \ldots, a_{2m}]$ и $[[c_1, \ldots, c_k]]$ соответственно. Тогда

$$(c_1, \dots, c_k) = (a_1 + 1, \underbrace{2, \dots, 2}_{a_2 - 1}, a_3 + 2, \underbrace{2, \dots, 2}_{a_4 - 1}, \dots, a_{2m-1} + 2, \underbrace{2, \dots, 2}_{a_{2m} - 1})$$

Мы докажем эту теорему двумя способами. Первый способ, которому посвящена эта глава, будет использовать матричные вычисления. Второй, более геометрический, рассматривается в следующей главе брошюры; он связан с действием модулярной группы на плоскости Лобачевского.

6.2. Группа $SL_2(\mathbb{Z})$ и её порождающие. Прежде чем перейти к первому доказательству, введем некоторые обозначения. Напомним, что через $SL_2(\mathbb{Z})$ обозначается группа целочисленных матриц размера 2×2 с определителем 1. Мы видели, что матрицы цепных дробей $M(c_1,...,c_k)$ и $M^+(a_1,...,a_{2m})$ принадлежат этой группе.

Обозначим через R, L и S следующие элементы группы $SL_2(\mathbb{Z})$.

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \qquad L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \qquad S = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Можно доказать (попробуйте сделать это самостоятельно или прочтите, например, в VII главе книги Ж.-П. Серра «Курс арифметики»), что эти три матрицы порождают группу SL₂(Z). Оказывается, хватает и любых двух из них: каждая из этих трех матриц выражается через две других.

Упражнение 6.2. Покажите, что $L = S^{-1}R^{-1}S$. Найдите выражения для R через S и Lи для S через R и L.

Элемент S имеет порядок 4 (т.е. $S^4 = I$); напротив, порядок элементов R и L бесконечен. Действительно, степени элементов R и L легко вычислить явно: так, $R^a = \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ и $L^a =$

 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ a & 1 \end{pmatrix}$ при любом $a \in \mathbb{Z}$.

Нетрудно выразить через эти образующие матрицы цепных дробей.

Предложение 6.3. *Матрицы* $M(c_1, \ldots, c_k)$ и $M^+(a_1, \ldots, a_{2m})$ допускают следующие разложения:

(6.8)
$$M^+(a_1,\ldots,a_{2m}) = R^{a_1} L^{a_2} R^{a_3} L^{a_4} \ldots R^{a_{2m-1}} L^{a_{2m}}$$

u

(6.9)
$$M(c_1, \dots, c_k) = R^{c_1} S R^{c_2} S \dots R^{c_k} S.$$

Доказательство. Легко видеть, что

$$\begin{pmatrix} a_i & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} = R^{a_i} \begin{pmatrix} 0 & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} \qquad \mathbf{H} \qquad \begin{pmatrix} a_{i+1} & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} L^{a_{i+1}}.$$

$$\begin{pmatrix} a_i & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{i+1} & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} = R^{a_i} L^{a_{i+1}},$$

Поэтому

$$\begin{pmatrix} a_i & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{i+1} & 1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} = R^{a_i} L^{a_{i+1}}$$

откуда и получается формула (6.8). Формула (6.9) еще проще: она следует из равенства

$$\begin{pmatrix} c_i & -1\\ 1 & 0 \end{pmatrix} = R^{c_i} S.$$

Отсюда получается следующее предложение.

Предложение 6.4. Имеет место равенство

$$(6.10) \quad M^+(a_1,\ldots,a_{2m}) = -M(a_1+1,\underbrace{2,\ldots,2}_{a_2-1},a_3+2,\underbrace{2,\ldots,2}_{a_4-1},\ldots,a_{2m-1}+2,\underbrace{2,\ldots,2}_{a_{2m}},1,1).$$

Отметим, что если бы мы уже доказали теорему 6.1, то равенство (6.10) можно было бы получить из предложения 5.17, которое утверждает, что $M^+ = MR$. Однако мы будем действовать по-другому: докажем равенство (6.10), а из него уже выведем теорему 6.1.

Нам понадобится следующая лемма.

Лемма 6.5. Имеют место равенства
$$R^a = -M(a+1,1,1)$$
 и $L^a = -M(1,\underbrace{2,\ldots,2}_{a},1,1)$

Доказательство. Первое равенство проверяется непосредственно.

Для доказательства второго равенства сперва заметим, что M(1,1,1) = -I, т.е. $\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} = -\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^2$. Далее, нетрудно проверить непосредственно, что $L = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1}$. А значит, L^a получается из матрицы $M(2)^a = M(2, \ldots, 2)$ при помощи сопряжения той же матрицей, что и требовалось.

Доказательство предложения 6.4. Поскольку M(1,1,1) = -I, из леммы 6.5 следует, что

$$R^{a_i}L^{a_{i+1}} = -M(a_i+1, \underbrace{2, \dots, 2}_{a_{i+1}}, 1, 1).$$

Тем самым предложение следует из соотношения (6.8) и простого равенства M(2, 1, 1, a + 1) = -M(a + 2) (проверка которого оставляется читателю в качестве упражнения). Предложение доказано.

Наконец, заметим, что последние три коэффициента в равенстве (6.10) — это (2, 1, 1), поэтому от них можно избавиться с помощью равенства M(2, 1, 1) = -R. Тем самым мы получаем, что

(6.11)
$$M^+(a_1,\ldots,a_{2m}) = M(a_1+1,\underbrace{2,\ldots,2}_{a_2-1},a_3+2,\underbrace{2,\ldots,2}_{a_4-1},\ldots,a_{2m-1}+2,\underbrace{2,\ldots,2}_{a_{2m}-1})R.$$

Из этого равенства следует, что первые столбцы матриц $M^+(a_1, \ldots, a_{2m})$ в левой части и $M(a_1 + 1, \ldots)$ в правой части равны. А значит, они отвечают разложению одного и того же числа. Это доказывает теорему 6.1.

6.3. Цепные дроби и триангуляции. Связь между коэффициентами разложения в положительную и отрицательную цепную дробь, описанная в теореме 6.1, на первый взгляд выглядит достаточно сложно. Но оказывается, что у неё есть естественная интерпретация в терминах триангуляций многоугольников. В этом параграфе мы приведем саму эту конструкцию, а в следующей главе опишем, как она связана с фризами и появлявшимися у нас раньше матрицами из $SL_2(\mathbb{Z})$.

Начнем с произвольной последовательности целых положительных чисел (a_1, \ldots, a_{2m}) . Рассмотрим две горизонтальные параллельные прямые. Нарисуем триангуляцию многоугольника, все вершины которого будут лежать на этих прямых; при этом в ней будут участвовать треугольники двух видов: направленные вершиной вверх (т.е. с двумя вершинами на нижней прямой и одной вершиной на верхней) и вершиной вниз. Начнем с того, что

 \square

нарисуем отрезок с концами на этих прямых; пусть верхний его конец будет первой вершиной нашего многоугольника, а нижний — последней. Пририсуем к этому отрезку справа a_1 треугольников, направленных вершиной вверх, с общей вершиной. Далее пририсуем к ним справа a_2 треугольников, направленных вершиной вниз; их общая вершина будет совпадать с правой вершиной последнего из треугольников, нарисованных на предыдущем шаге. Затем дорисуем a_3 треугольников вершиной вверх, a_4 вершиной вниз, и так далее; поскольку общее число таких групп равно 2m, то есть четно, вершина последнего треугольника будет направлена вниз (см. рис. 6.1). Тем самым мы отметим $a_2 + a_4 + \cdots + a_{2m} + 1$ точек на верхней прямой и $a_1 + a_3 + \cdots + a_{2m-1} + 1$ на нижней.



Рис. 6.1. Триангуляция, отвечающая набору (a_1, \ldots, a_{2m}) .

Пусть $n = a_1 + a_2 + \cdots + a_{2m} + 2$. Мы получили триангуляцию *n*-угольника, причем триангуляцию специального вида: у нее будет ровно два «уха», или, что то же самое, дерево этой триангуляции (см. доказательство предложения 4.7) не имеет тройных вершин — такое дерево называют бамбуком.

Обозначим через k количество треугольников, которые смотрят вниз — т.е. $k = a_2 + a_4 + \cdots + a_{2m}$. Получается, что «уши» нашей триангуляции будут находиться в вершинах k + 1 и n.

Несложно выписать сущность (c_1, \ldots, c_n) такой триангуляции. Так, $c_1 = a_1 + 1$: в первой вершине сходятся a_1 треугольников с вершиной вверх и один направленный вершиной вниз. Далее следует $a_2 - 1$ двоек: в вершине, заключенной между двумя треугольниками, направленными вниз, сходятся два треугольника. Сущность следующей вершины равна $a_3 + 2$ — в ней сходятся два треугольника, направленных вниз, и a_3 направленных вверх, и так далее вплоть до (k + 1)-й вершины, сущность которой равна 1. Далее мы следуем в обратном порядке: $c_{k+2} = a_{2m} + 1$, за ней следует $a_{2m-1} - 1$ двойка, и так далее вплоть до $c_n = 1$.

Пример 6.6. Набору [1, 2, 1, 1] отвечает следующая триангуляция семиугольника:



Её сущность равна (2, 2, 3, 1, 2, 4, 1).

Таким образом, выражение в теореме 6.1 есть набор сущностей вершин такой триангуляции, только не весь, а его «половина»: следует взять сущности вершин, заключенных между двумя «ушами». Следующее утверждение показывает, что такой набор сущностей однозначно определяет триангуляцию.

Упражнение 6.7. Пусть дана триангуляция *n*-угольника с двумя «ушами», и её сущность равна (c_1, \ldots, c_n) , причем $c_{k+1} = c_n = 1$. Покажите, что зная c_1, \ldots, c_k , можно восстановить значения c_{k+2}, \ldots, c_{n-1} , и наоборот.

Более того, по такой триангуляции оказывается можно восстановить и саму цепную дробь, и все подходящие дроби — как положительные, так и отрицательные. Для этого определим на дробях операцию суммы Фарея.

Определение 6.8. Пусть *p/q* и *r/s* — две неотрицательные несократимые дроби. Их *суммой Фарея*, или *медиантой*, называется дробь

$$\frac{p}{q} \oplus \frac{r}{s} = \frac{p+r}{q+s}.$$

Таким образом, сумма Фарея — это результат «неправильного» сложения дробей: то, что получается, если складывать числитель с числителем, а знаменатель со знаменателем.

Упражнение 6.9. Проверьте, что сумма Фарея двух дробей заключена между ними: если p/q < r/s, то p/q < (p+r)/(q+s) < r/s.

Кроме того, добавим ко множеству неотрицательных рациональных чисел элемент $\infty = 1/0$. Ясно, что такой элемент также можно прибавлять по Фарею к другим числам: $p/q \oplus \infty = (p+1)/q$.

Теперь опишем конструкцию, позволяющую вычислить по описанной выше триангуляции (то есть набору (a_1, \ldots, a_{2m}) цепную дробь. Поставим в двух самых левых вершинах триангуляции снизу число 0 = 0/1, а сверху число $\infty = 1/0$. Далее будем последовательно заполнять вершины триангуляции слева направо следующим образом: если в двух вершинах треугольника уже стоят дроби, то в третьей поставим их сумму Фарея. Так, в примере 6.6 у нас получится следующее:



Теорема 6.10. Пусть дана триангуляция n-угольника, построенная по набору (a_1, \ldots, a_{2m}) , u её сущность равна (c_1, \ldots, c_n) , причем $c_k = c_n = 1$. Если заполнить её вершины дробями p_i/q_i по описанному выше правилу, то будет верно следующее:

- (1) $p_{k+1}/q_{k+1} = [a_1, \dots, a_{2m}] = [[c_1, \dots, c_k]];$
- (2) $p_i/q_i = [[c_1, \ldots, c_{i-1}]];$ иначе говоря, на верхней стороне триангуляции стоят отрицательные подходящие дроби к $p_{k+1}/q_{k+1};$
- (3) Рассмотрим «зигзаг»: путь, состоящий из отрезков с концами на верхней и нижней стороне и соединяющий левую нижнюю вершину с правой верхней (см. рис. 6.1). Тогда последовательность положительных подходящих дробей расположена вдоль этого зигзага.

Мы докажем эту теорему в следующем разделе. Для этого нам понадобится вложить триангуляцию в плоскость Лобачевского и изучить, как на ней действуют матрицы цепных дробей, которые мы рассматривали в предыдущем параграфе. Обратите внимание, что п. (1) теоремы — это по существу теорема 6.1, которую мы тем самым докажем другим способом.

Пример 6.11. В примере 6.6 положительными подходящими дробями к 7/5 будут 1/1, 3/2, 4/3 и 7/5. Отрицательные подходящие дроби — это 2/1, 3/2 и 7/5.

7. ТРИАНГУЛЯЦИИ И ГРАФ ФАРЕЯ

В этом разделе мы установим связь между фризами и группой $PSL_2(\mathbb{Z})$. Наше изложение будет очень близко следовать статье [5], которую мы рекомендуем изучить заинтересованному читателю. Я также благодарен её авторам за разрешение использовать приведенные ниже рисунки.

7.1. Граф Фарея. Рассмотрим множество рациональных чисел \mathbb{Q} , каждое из которых мы представляем себе как несократимую дробь a/b, и добавим к нему элемент 1/0 («бесконечность»). Получим множество $\overline{\mathbb{Q}} = \mathbb{Q} \cup \{\infty\}$.

Определим *граф Фарея* как бесконечный граф, вершиными которого являются элементы $\overline{\mathbb{Q}}$. Условимся, что две вершины a/b и c/d соединяются ребром тогда и только тогда, когда $ad - bc = \pm 1$. Это равносильно тому, что det $\begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} = \pm 1$.

Если между такими вершинами есть ребро, то матрицы $\begin{pmatrix} a & a+c \\ b & b+d \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} c & a+c \\ d & b+d \end{pmatrix}$ также имеют определитель ± 1 — а значит, обе вершины a/b и c/d также соединены с дробью (a+c)/(b+d), т.е. с суммой Фарея этих дробей.

Упражнение 7.1. Проверьте, что это полное описание всех треугольников: всякий треугольник, т.е. тройка вершин, попарно соединенных ребрами, в графе Фарея имеет вид (a/b, c/d, (a+c)/(b+d)).

Упражнение 7.2. Проверьте, что если a/b и c/d — несократимые дроби и ad - bc = 1, то и их медианта (a + c)/(b + d) тоже несократимая дробь.

Граф Фарея удобно рисовать на гиперболической плоскости. Мы будем использовать для этого модель в верхней полуплоскости; вкратце напомним основные понятия, связанные с ней.

Пусть $\mathbb{H} = \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im } z > 0\}$ — множество комплексных чисел с положительной мнимой частью. Будем называть его *гиперболической плоскостью*. Вещественную прямую, пополненную точкой ∞ , будем называть *абсолютом*: ее можно воспринимать как множество «бесконечно удаленных точек» (или «асимптотических направлений») гиперболической плоскости. *Прямыми* на \mathbb{H} будем называть полуокружности с центром на абсолюте (т.е. перпендикулярные вещественной прямой) и вертикальные полупрямые с началом на абсолюте.

Поместим вершины графа Фарея на абсолют и изобразим каждое ребро прямой (именно прямой, а не отрезком!) на Ш. Как мы покажем в следствии 7.9, нарисованный таким образом на верхней полуплоскости граф оказывается «планарен»: его ребра пересекаются только в вершинах.

Далее нас будет интересовать не весь граф Фарея, а лишь его подграф, вершинами которого являются неотрицательные рациональные числа, а также число $\infty = 1/0$. Кроме того, мы изобразим гиперболическую плоскость в верхней полуплоскости несколько необычным образом: поместим точку ∞ в конечную часть абсолюта, а на бесконечность уведем какоенибудь отрицательное число. Например, для этого можно применить к стандартной модели в верхней полуплоскости преобразование $z \mapsto \frac{z}{z+1}$. Оно переведет 0 в 0, 1 в 1/2, а бесконечность переведет в 1. Тем самым положительная полуось перейдет в интервал (0, 1) на вещественной оси, а полуплоскость Re z > 0 перейдёт во внутренность полукруга, диаметром которого является этот интервал. Далее, все ребра графа Фарея, соединяющие положительные точки абсолюта, будут изображаться как полуокружности, лежащие внутри этого полукруга. Подграф, образованный всеми положительными вершинами (а также 0 и ∞) и соединяющими их рёбрами, мы будем называть *положительным графом Фарея*. Некоторый его фрагмент изображён на рис. 7.1.

Для полноты изложения отметим, что весь граф Фарея тоже можно красиво изобразить в конечной области, применив к нему преобразование $z \mapsto i \frac{z-i}{z+i}$. Оно переводит абсолют



Рис. 7.1. Фрагмент положительного графа Фарея

(вещественную прямую) в единичную окружность, а верхнюю полуплоскость — в единичный диск. При этом ∞ переходит в i, 0 в -i, а точки -1 и 1 остаются на местах. Наконец, перпендикулярные абсолюту дуги (обобщённых) окружностей переходят в перпендикулярные абсолюту дуги (обобщённых) окружностей; и мы получаем картину, изображённую на рис. 7.2.



Рис. 7.2. Граф Фарея в круге

7.2. Вложение триангуляции в положительный граф Фарея. В нарисованный таким образом на плоскости граф Фарея удобно вкладывать триангуляции многоугольников — при этом вершины многоугольника будут лежать на абсолюте. Рассмотрим какуюлибо триангуляцию *n*-угольника и отметим у неё одну из сторон; будем считать, что эта сторона соединяет *n*-ю и первую вершины. Напишем в её концах 0 = 0/1 и $\infty = 1/0$. Далее сопоставим каждой вершине положительное рациональное число по алгоритму, аналогичному описанному в §4.3: для каждого треугольника, в двух вершинах которого уже стоят числа, запишем в третьей вершине их сумму по Фарею.

Теперь отметим все полученные *n* рациональных чисел на абсолюте гиперболической плоскости и проведем между ними всевозможные ребра графа Фарея; мы получим исходную триангуляцию.

Такой способ расстановки чисел в вершинах триангуляции уже появлялся в §6.3 в частном случае триангуляций-«бамбуков»: при этом отмеченной стороной являлась левая сторона триангуляции.

Пример 7.3. Рассмотрим триангуляцию семиугольника, изображённую на с. 30. Её вложение в граф Фарея показано ниже.



Рис. 7.3. Триангуляция, отвечающая дроби 7/5

Предложение 7.4. Пусть в результате в вершинах п-угольника окажутся несократимые дроби $u_1/v_1 = 1/0, u_2/v_2, \ldots, u_n/v_n = 0/1$. Тогда у фриза, отвечающего этой триангуляции, имеются соседние диагонали v_2, \ldots, v_n и $u_1, u_2, \ldots, u_{n-1}$.

Доказательство. Вычисляя суммы Фарея дробей, мы по существу дважды применяем алгоритм из §4.3: отдельно к их числителям, отдельно к знаменателям. Поэтому последовательность числителей будет диагональю фриза, отвечающей начальным данным $u_1 = 1, u_n = 0$, а последовательность знаменателей будет отвечать начальным данным $v_1 = 0, v_n = 1.$

Пример 7.5. Триангуляции из предыдущего примера будут соответствовать диагонали фриза



Таким образом, числитель и знаменатель каждой из дробей, стоящих в вершинах, оказываются написанными вдоль антидиагонали. В частности, на антидиагоналях можно прочесть отрицательные подходящие дроби к 7/5, а именно 1/1, 4/3 и собственно 7/5.

7.3. Действие группы $PSL_2(\mathbb{Z})$. Рассмотрим группу вещественных матриц размера 2×2 с единичным определителем, которую обозначим через $SL_2(\mathbb{R})$. Эта группа действует на \mathbb{H} следующим образом: элемент $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ переводит точку $z \in \mathbb{H}$ в точку $\frac{az+b}{cz+d}$

Упражнение 7.6. Проверьте, что это и в самом деле действие, т.е. что верхняя полуплоскость переходит в себя, а произведению матриц отвечает композиция отображений.

Кроме того, в $SL_2(\mathbb{R})$ есть нетривиальный элемент, действующий на \mathbb{H} тождественно: это матрица -I. Поэтому можно считать, что на \mathbb{H} действует факторгруппа $SL_2(\mathbb{R})/\{\pm I\}$, которую мы обозначим через $PSL_2(\mathbb{R})$. Её элементы можно воспринимать как матрицы размера 2×2, рассматриваемые с точностью до знака: $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} -a & -b \\ -c & -d \end{pmatrix}$ будут отвечать одному и тому же элементу в факторгруппе.

Наконец, мы рассмотрим не всю группу $PSL_2(\mathbb{R})$, а только ее подгруппу $PSL_2(\mathbb{Z})$, образованную всеми целочисленными матрицами из $PSL_2(\mathbb{R})$. Очевидно, что она переводит рациональные точки абсолюта в рациональные точки. Кроме того, она также сохраняет и граф Фарея: две точки p/q и r/s соединены ребром тогда и только тогда, когда матрица граф Фарея: две точки p/q и r/s соединены реором тогда и только тогда, когда матрица $\binom{p}{q}$ и $\binom{p}{q}$ и меет определитель ± 1 ; а это значит, что для любой матрицы $\binom{a}{c} \binom{b}{c} \in PSL_2(\mathbb{Z})$ произведение $\binom{a}{c} \binom{b}{d} \binom{p}{q} \binom{r}{q}$ имеет тот же определитель — а это равносильно тому, что образы этих точек, $\frac{ap+bq}{cp+dq}$ и $\frac{ar+bs}{cr+ds}$, также соединены ребром. Тем самым получается,

что группа $PSL_2(\mathbb{Z})$ сохраняет граф Фарея.

Замечание 7.7. На действие выше можно смотреть следующим образом: группа $SL_2(\mathbb{R})$ естественно действует на \mathbb{C}^2 . Сопоставив ненулевому вектору $(z_1, z_2) \in \mathbb{C}^2$ его «наклон» $z = z_1/z_2 \in \mathbb{C} \cup \{\infty\}$ (иными словами, рассмотрев действие $\mathrm{SL}_2(\mathbb{R})$ на прямых, проходящих через начало координат), мы и получаем описанное выше действие. В этих терминах абсолют соответствует сохраняемому $SL_2(\mathbb{R})$ вещественному подмножеству $\mathbb{R}^2 \subset \mathbb{C}^2$. При этом соединённой ребром паре вершин (p/q) и (r/s) из графа Фарея отвечает пара векторов (p,q) и $(r,s) \in \mathbb{Z}^2$, для которых det $\begin{pmatrix} p & r \\ q & s \end{pmatrix} = 1$. Конечно же, матрица $A \in SL(2,\mathbb{Z})$ переводит такую пару векторов в такую же.

Предложение 7.8. Группа $\mathrm{PSL}_2(\mathbb{Z})$ точно транзитивно действует на ориентированных рёбрах графа Фарея: любое ребро (с отмеченными началом и концом) можно перевести в любое, причем единственным преобразованием.

Доказательство. Докажем, что пару ($\infty, 0$) можно перевести в пару (p/q, r/s), где ps - pqr=1, дробно-линейным преобразованием с целыми коэффициентами. Действительно, это преобразование задается матрицей $\binom{p \ r}{q \ s}$. Точность действия также очевидна: для этого достаточно проверить, что стабилизатор пары (∞ , 0) тривиален, а он, как легко видеть, состоит из матриц $\pm I$.

Отсюда нетрудно вывести уже заявленный выше результат о планарности графа Фарея.

Следствие 7.9. Рёбра графа Фарея не пересекаются.

Доказательство. В силу транзитивности действия достаточно доказать, что ребро, соединяющее 0 и ∞ , не пересекается ни с каким другим ребром. Действительно, такое другое ребро должно было бы соединять положительную и отрицательную точки a/b > 0 > -c/d (здесь a, b, c, d — целые положительные числа). Но тогда определитель $ad-b(-c) = ad+cb \geq 2$ не может быть равен 1.

Следствие 7.10. Пусть на графе Фарея отмечены две триангуляции п-угольника с одинаковыми сущностями и с отмеченными соответственными сторонами. Тогда существует единственный элемент $PSL_2(\mathbb{Z})$, совмещающий эти триангуляции и переводящий отмеченную сторону в отмеченную.

Доказательство. В силу предложения 7.8 существует единственный элемент $PSL_2(\mathbb{Z})$, совмещающий отмеченные стороны — так, чтобы полуплоскость, содержащая первый многоугольник, переходила бы в полуплоскость, содержащую второй многоугольник. Далее все вершины триангуляции восстанавливаются однозначно при помощи обхода дерева триангуляции: третья вершина каждого из треугольников получается как сумма Фарея первых двух.

7.4. Порождающие элементы группы PSL₂(Z). В §6.2 мы видели, что любые две из следующих трёх матриц

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \qquad L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \qquad S = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

порождают группу $SL_2(\mathbb{Z})$. Значит, их образы порождают $PSL_2(\mathbb{Z})$. Допуская некоторую вольность речи, мы будем использовать для элементов $PSL_2(\mathbb{Z})$ те же обозначения, что и в группе $SL_2(\mathbb{Z})$, т.е. до факторизации.

Посмотрим, как эти преобразования действуют на \mathbb{H} . Оператор R переводит z в z + 1. Он оставляет точку ∞ на месте, а абсолют сдвигает на единицу вправо. Соответственно, преобразование $R^a = \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ сдвигает абсолют на a единиц; здесь a может быть любым целым числом (в т.ч. отрицательным).

Оператор S = -1/z — это композиция инверсии и симметрии относительно мнимой оси. Это преобразование инволютивно: $S^2 = I$. Обратите внимание, что в SL₂(\mathbb{Z}) матрица $\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ имела порядок 4, а не 2.

Далее, оператор L оставляет на месте 0, а точку z = 1/n переводит в 1/(n+1). Нетрудно посчитать (проделайте это), что $LS = SR^{-1}$.

7.5. Последовательности Штерна–Броко. Теперь рассмотрим прямую C, соединяющую ∞ и 0 (как и раньше, мы будем считать прямые ориентированными; на картинке ниже стрелка направлена от начала прямой к концу). Если применить к ней оператор R, мы получим прямую RC с началом в ∞ и концом в 1; аналогично прямая LC соединяет точки 1 и 0 на абсолюте. Мы получили треугольник, ограниченный тремя прямыми C, LC и RC. Назовем этот треугольник T. Координата его средней вершины есть сумма Фарея координат двух крайних вершин.

Далее применим к треугольнику T оператор L. Мы получим треугольник LT с вершинами в 0, 1/2 и 1. Стороны этого треугольника — это прямые LC, L^2C и LRC. Аналогично у треугольника RT будут стороны RC, RLC и R^2C (см. рис. 7.4). Тем самым мы получили следующий набор вершин абсолюта: 0, 1/2, 1, 2, ∞ .



Рис. 7.4. Триангуляция Штерна-Броко

Эту процедуру можно продолжить: применим операторы L и R к треугольникам LT и RT. В результате получим набор из девяти вершин $0 = 0/1, 1/3, 1/2, 2/3, 1, 3/2, 2/1, 3/1, <math>\infty = 1/0$, причем каждая пара последовательных вершин будет соединена одной из прямых, которые получаются из C применением трёх операторов L и R (во всевозможных порядках). Отметим, что каждая новая вершина на абсолюте будет получаться как сумма Фарея своих соседей.

Это мотивирует следующее определение.

Определение 7.11. *Нулевой последовательностью Штерна–Броко* называется последовательность дробей (0/1, 1/1, 1/0). Далее, *k-й последовательностью Штерна–Броко* называется последовательность дробей, получаемая из (k - 1)-й последовательности вставкой между каждыми её соседними членами их медианты.

Так, первой последовательностью Штерна–Броко будет (0/1, 1/2, 1/1, 2/1, 1/0), второй — (0/1, 1/3, 1/2, 2/3, 1/1, 3/2, 2/1, 3/1, 1/0), и так далее.

Замечание 7.12. Здесь, как и ранее, мы рассматриваем бесконечность как допустимое «число», выражаемое несократимой «дробью» 1/0. Нам это никак не помешает, поскольку мы будем только сравнивать дроби между собой (мы при этом считаем, что бесконечность больше любого числа) и брать их суммы Фарея. В дальнейшем мы никак не будем дополнительно оговаривать этот момент.

Легко видеть, что каждая последовательность Штерна–Броко будет возрастать: действительно, это следует из того, что медианта двух дробей заключена между ними. В частности, поэтому все члены в каждой из этих последовательностей будут различны.

- **Теорема 7.13.** (1) Любые две дроби p/q < r/s, являющиеся соседями в некоторой последовательности Штерна-Броко, удовлетворяют соотношению qr - ps = 1, т.е. соответствующие числа соединены ребром в графе Фарея;
 - (2) все дроби, встречающиеся в последовательностях Штерна-Броко, несократимы;
 - (3) всякая несократимая дробь a/b > 0 встречается в некоторой последовательности Штерна-Броко.

Доказательство. (1) Докажем это по индукции. Для нулевой последовательности утверждение очевидно. Далее, когда мы вставляем между соседними числами p/q и r/s их медианту (p+r)/(q+s), то и для неё эти соотношения оказываются верными. Действительно:

$$(p+r)q - (q+s)p = qr - ps = 1;$$
 $r(q+s) - s(p+r) = qr - ps = 1$

(2) Это следует из предыдущего пункта: если qr - ps = 1, то *p* и *q* взаимно просты.

(3) Покажем, что всякая несократимая дробь a/b рано или поздно встретится в некоторой последовательности Штерна–Броко. Предположим, что она не встретилась в некоторой

такой последовательности. Найдем в этой последовательности ближайшие отношения p/q и r/s, между которыми заключена эта дробь:

Далее перейдем к следующей строке, заменив один из концов отрезка [p/q; r/s] на медианту его концов и выбрав ту половину, которая содержит a/b. Этот процесс не может продолжаться бесконечно, поскольку условия

$$a/b - p/q > 0$$
 и $r/s - a/b > 0$

означают, что

$$aq - bp \ge 1$$
 и $br - as \ge 1$.

А значит,

(7.12)

$$(r+s)(aq-bp) + (p+q)(br-as) \ge p+q+r+s.$$

С другой стороны, левая часть (7.12) равна

$$(r+s)(aq-bp) + (p+q)(br-as) = a((r+s)q - (p+q)s) + b((p+q)r - (r+s)p) = a+b.$$

Поэтому неравенство (7.12) равносильно неравенству

$$a+b \ge p+q+r+s$$

Но с каждым шагом либо p, либо q, либо r, либо s возрастает, стало быть, это неравенство перестанет быть выполненным самое большее через a + b шагов.

Вернёмся к рис. 7.4. Из предыдущей теоремы следует, что каждое положительное рациональное число получается как вершина некоторого треугольника в триангуляции Штерна– Броко.

Эту картинку можно еще представлять себе следующим образом. Рассмотрим бесконечный граф, двойственный к триангуляции Штерна–Броко: каждому треугольнику в триангуляции сопоставим вершину графа, в которой напишем число, отвечающее «средней» вершине треугольника. Вершины, отвечающие треугольникам, смежным по стороне, соединим рёбрами. Мы получим двоичное дерево, начало которого изображено на рис. 7.5 — оно также называется деревом Штерна–Броко.



Рис. 7.5. Дерево Штерна-Броко

Теорема 7.13 утверждает, что каждое положительное рациональное число встречается в дереве Штерна–Броко, причем лишь один раз. Тем самым каждое число можно закодировать путём из корня (т.е. из 1/1) в соответствующую вершину: т.е. каждому числу отвечает однозначно определенное слово из букв R и L. Например, числу 2/1 будет отвечать слово R, числу 4/3 — слово RLL, и так далее. Отсюда получается такое следствие.

Следствие 7.14. Для каждой положительной несократимой дроби $\frac{p}{q} > 1$ существует такая последовательность степеней (a_1, \ldots, a_{2m}) , для которой

$$\binom{p}{q} = R^{a_1} L^{a_2} \dots R^{a_{2m-1}} L^{a_{2m}} \binom{1}{0} = M^+(a_1, \dots, a_{2m}) \binom{1}{0},$$

причем все $a_i > 0$.

Доказательство. Заметим, что $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ отвечает элементу 1 абсолюта. Теорема 7.13 утверждает, что любое положительное рациональное число на абсолюте можно получить из 1 применением слова, состоящего из R и L. А поскольку p/q > 1, то это число будет лежать в правой половине графа Штерна–Броко, то есть первой буквой соответствующего слова будет R, а не L.

Подытожим. Мы выяснили геометрический смысл операторов R и L: они переводят весь граф Штерна–Броко в его правую и левую половину соответственно. Тем самым набор (a_1, \ldots, a_{2m}) определяет преобразование $M^+(a_1, \ldots, a_{2m})$, переводящее прямую $(\infty, 0)$ в прямую $(\frac{p}{q}, \frac{r}{s})$, где r/s — последняя подходящая дробь к $\frac{p}{q}$. Все получающиеся при этом треугольники определяют триангуляцию-«бамбук» многоугольника с отмеченной стороной $(\infty, 0)$ и состоящую из a_1 треугольников вершиной «вверх», a_2 треугольников вершиной «вверх», a_3 вершиной «вверх» и так далее.

7.6. Поворот триангуляции. Рассмотрим триангуляцию *n*-угольника, вложенную в граф Фарея. Обозначим через c_1 сущность первой вершины — иначе говоря, число треугольников, сходящихся в вершине с отметкой 0. Это значит, что во второй вершине стоит отметка $1/c_1$ (почему?). Рассмотрим оператор $\begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ и применим его к плоскости \mathbb{H} . Посмотрим, куда при этом перейдет наш *n*-угольник. Для начала посмотрим на образы первых двух вершин, нуля и $1/c_1$:

$$\begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \infty; \qquad \begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ c_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 0.$$

Получается, что они перейдут в последнюю и первую вершины соответственно, а соединяющая их прямая перейдет в прямую (∞ , 0).

Далее, остальные вершины также перейдут в какие-то вершины с положительными координатами (контрольный вопрос: почему положительными?). Вообще говоря, они не будут совпадать с вершинами исходного *n*-угольника. Однако сохранится их взаимное расположение на прямой, т.к. абсолют сохраняется этим преобразованием.

Пусть $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1/c_1, \ldots, \alpha_n = \infty$ — вершины исходного многоугольника, где $p_i \in \mathbb{Q}_{\geq 0} \cup \{\infty\}$. Обозначим через β_i образ точки α_i при преобразовании $\begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$. Наш *n*-угольник перейдет в *n*-угольник с вершинами $\beta_1 = \infty, \beta_2 = 0, \ldots, \beta_n = c$.

Такая операция будет соответствовать повороту *n*-угольника. Мы доказали следующее предложение.

Предложение 7.15. Преобразование $\begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ переводит *n*-угольник со стороной $(\infty, 0)$ и сущностью (c_1, \ldots, c_n) (где первой вершиной считается точка 0) в *n*-угольник со стороной $(\infty, 0)$ и сущностью $(c_n, c_1, \ldots, c_{n-1})$.

Отсюда вытекает следствие:

Следствие 7.16. Пусть $(c_1, ..., c_n) - сущность <math>n$ -угольника. Тогда

$$\begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} c_n & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \pm I.$$

Доказательство. Рассмотрим *n*-угольник с отмеченной стороной $(\infty, 0)$ и сущностью (c_1, \ldots, c_n) . В силу предыдущего предложения композиция таких преобразований сделает из него *n*угольник с той же отмеченной стороной и той же сущностью. Согласно следствию 7.10, эта композиция есть тождественный элемент из $PSL_2(\mathbb{Z})$, то есть $\pm I$.

Ещё одно следствие из предложения 7.15 можно получить, если рассмотреть триангуляцию-«бамбук» с сущностью ($c_1, \ldots, c_k, 1, c_{k+2}, \ldots, 1$). Пусть p/q — координата (k+1)-й вершины. Рассмотрим оператор, поворачивающий нашу триангуляцию k раз. Этот оператор — это

$$\begin{pmatrix} c_1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} c_k & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = M(c_1, \dots, c_k).$$

Он переводит первую вершину триангуляции, т.е. точку ∞ , в (k + 1)-ю, т.е. в $p/q = [[c_1, \ldots, c_k]]$. При этом последняя вершина переходит в вершину с номером k, то есть в $\tilde{r}/\tilde{s} = [[c_1, \ldots, c_{k-1}]]$.

Тем самым мы доказали, что если наборы (a_1, \ldots, a_{2m}) и (c_1, \ldots, c_k) построены по одной и той же триангуляции-«бамбуку», то операторы $M^+(a_1, \ldots, a_{2m})$ и $M(c_1, \ldots, c_k)$ переводят точку ∞ в одну и ту же точку. Значит, первые столбцы соответствующих матриц совпадают (вообще говоря, с точностью до знака), что еще раз доказывает теорему 6.1.

Упражнение 7.17. Докажите подобным способом предложение 6.4.

8. Подведем итоги

8.1. Цепные дроби и фризы как решения уравнений в $SL_2(\mathbb{Z})$. В предыдущих главах мы говорили о фризах, о разложениях рациональных чисел в цепную дробь и о связанных с ними тождествах в группах $PSL_2(\mathbb{Z})$ и $SL_2(\mathbb{Z})$.

Мы увидели, что по положительному рациональному числу p/q можно построить его разложения в положительную и отрицательную цепную дробь; этим разложениям соответствует триангуляция-«бамбук» некоторого *n*-угольника. Если сущность *n*-угольника равна $(c_1, \ldots, c_k, 1, c_{k+2}, \ldots, c_{n-1}, 1)$, то $p/q = [[c_1, \ldots, c_k]]$. При этом сущность *n*-угольника даёт решение матричного уравнения

$$M(c_1,\ldots,c_n)=-I.$$

Более общим образом, такое решение имеет место для сущности произвольной триангуляции n-угольника, не обязательно для «бамбука». Такие триангуляции определяют фризы порядка n. Элементы фризов строятся исходя из сущности триангуляции как континуанты. В частности, если триангуляция являлась «бамбуком» и соответствовала числу p/q, то на соседних диагоналях фриза можно прочесть числители и знаменатели подходящих дробей к p/q.

8.2. Снова триангуляции и 3d-разрезания. Возникает вопрос: а для каких наборов (c_1, \ldots, c_n) матрица $M(c_1, \ldots, c_n)$ оказывается равной $\pm I$, то есть определяет тождественное преобразование в $PSL_2(\mathbb{Z})$? Все ли такие наборы получаются из триангуляций? Очевидно, что нет: так, в любое место имеющегося решения можно дописать три единицы подряд и снова получить решение, воспользовававшись соотношением M(1, 1, 1) = -I. А как описать все решения?

Полный ответ на этот вопрос был получен совсем недавно, в 2018 году. Он принадлежит В. Ю. Овсиенко [6]. Для того, чтобы его сформулировать, определим сначала понятие 3*d*-разрезания выпуклого многоугольника.

Определение 8.1. З*d*-разрезанием выпуклого *n*-угольника (с пронумерованными вершинами) называется его разрезание набором непересекающихся диагоналей на многоугольники, число сторон каждого из которых кратно 3. Сущностью разрезания *n*-угольника называется набор чисел (c_1, \ldots, c_n) , где c_i — число многоугольников, сходящихся в *i*-й вершине.

Тем самым вместо триангуляций мы будем рассматривать разрезания *n*-угольника на треугольники, шестиугольники, девятиугольники и т.д. В отличие от случая триангуляций, 3*d*-разрезание *n*-угольника нельзя восстановить по его сущности:

Упражнение 8.2. Приведите пример двух различных 3*d*-разрезаний *n*-угольника с одинаковыми сущностями.

Указание. Достаточно взять n = 8.

Оказывается, что помимо триангуляций, решения уравнения $M(c_1, \ldots, c_n) = \pm I$ могут происходить и из других 3*d*-разрезаний *n*-угольника. А именно, верна следующая теорема.

Теорема 8.3 ([6]). Равенство $M(c_1, \ldots, c_n) = \pm I$ имеет место тогда и только тогда, когда (c_1, \ldots, c_n) является сущностью некоторого 3d-разрезания n-угольника. При этом $M(c_1, \ldots, c_n) = -I$, если число участвующих в разрезании многоугольников с четным числом сторон четно, и $M(c_1, \ldots, c_n) = I$ в противном случае.

Е. Ю. Смирнов

Список литературы

- D. Broline, D. W. Crowe, and I. M. Isaacs. The geometry of frieze patterns. *Geometriae Dedicata*, 3:171–176, 1974.
- John H Conway and Harold SM Coxeter. Triangulated polygons and frieze patterns. The Mathematical Gazette, 57(401):175–183, 1973.
- [3] John H Conway and HSM Coxeter. Triangulated polygons and frieze patterns (continued). The Mathematical Gazette, 57(401):175–183, 1973.
- [4] Sophie Morier-Genoud. Coxeter's frieze patterns at the crossroads of algebra, geometry and combinatorics. Bulletin of the London Mathematical Society, 47(6):895–938, 2015.
- [5] Sophie Morier-Genoud and Valentin Ovsienko. Farey boat: Continued fractions and triangulations, modular group and polygon dissections. Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, 121(2):91–136, 2019.
- [6] Valentin Ovsienko. Partitions of unity in SL(2, ℤ), negative continued fractions, and dissections of polygons. Res. Math. Sci., 5(2):Paper No. 21, 25, 2018.
- [7] Alexey Vladimirovich Ustinov. A short proof of euler's identity for continuants. Mathematical Notes, 79(1):146-147, 2006.
- [8] Doron Zeilberger. Dodgson's determinant-evaluation rule proved by two-timing men and women. The Electronic Journal of Combinatorics [electronic only], 4(2):Research-paper, 1997.
- [9] В. И. Арнольд. Цепные дроби. МЦНМО, 2009.
- [10] Мартин Гарднер. Математические досуги. Мир, 1988.
- [11] Джон Конвей. Числовые фризы. Квант, (3):69-70, 1991.
- [12] С.К. Ландо. Введение в дискретную математику. МЦНМО, 2012.
- [13] Е. Ю. Смирнов. Числовые фризы. Квант, (5):15-24, 2020.
- [14] Е.Ю. Смирнов. Три взгляда на ацтекский бриллиант. МЦНМО, 2015.
- [15] А. Я. Хинчин. Цепные дроби. Физматлит, 1960.

Email address: esmirnov@hse.ru