

Isttitle



При поддержке Фонда Президентских грантов

# **Математика НОН-СТОП**

## **Сборник задач**

Б.А. Золотов      Д.Г. Штукенберг

И.А. Чистяков      А.В. Семенов      И.С. Алексеев

Фонд «Время Науки»

Санкт-Петербург  
Ноябрь 2018

# Предисловие

*И.А. Чистяков — Президент Фонда «Время науки», директор ЧОУ  
ОиДО «Лаборатория непрерывного математического образова-  
ния», автор задач Олимпиады «Математика НОИ-СТОП» в 2010–  
2015 годах*

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque

felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

# Оглавление

<b>Предисловие</b>	<b>I</b>
<b>Условия задач 2018 года</b>	<b>1</b>
4 класс . . . . .	1
5 класс . . . . .	4
6 класс . . . . .	8
7 класс . . . . .	13
8 класс . . . . .	19
7 класс, профильный вариант . . . . .	26
8 класс, профильный вариант . . . . .	31
<b>Условия задач 2017 года</b>	<b>36</b>
4 класс . . . . .	37
5 класс . . . . .	39
6 класс . . . . .	42
7 класс . . . . .	46
8 класс . . . . .	51
7 класс, профильный вариант . . . . .	56
8 класс, профильный вариант . . . . .	60
<b>Условия задач 2016 года</b>	<b>64</b>
5 класс . . . . .	65
6 класс . . . . .	67
7 класс . . . . .	72
8 класс . . . . .	77
7 класс, профильный вариант . . . . .	83
8 класс, профильный вариант . . . . .	86
<b>Решения задач 2018 года</b>	<b>90</b>
4 класс . . . . .	91
5 класс . . . . .	96
6 класс . . . . .	99
7 класс . . . . .	102

8 класс . . . . .	111
7 класс, профильный вариант . . . . .	115
8 класс, профильный вариант . . . . .	122
<b>Решения задач 2017 года</b>	<b>124</b>
4 класс . . . . .	125
5 класс . . . . .	128
6 класс . . . . .	131
7 класс . . . . .	136
8 класс . . . . .	143
7 класс, профильный вариант . . . . .	148
8 класс, профильный вариант . . . . .	148
<b>Решения задач 2016 года</b>	<b>156</b>
5 класс . . . . .	157
6 класс . . . . .	161
7 класс . . . . .	170
8 класс . . . . .	181
<b>Решения задач 2012 года</b>	<b>191</b>
5 класс . . . . .	193
6 класс . . . . .	195
7 класс . . . . .	199
8 класс . . . . .	202
<b>Решения задач 2011 года</b>	<b>205</b>
5 класс . . . . .	207
6 класс . . . . .	208
7 класс . . . . .	208
8 класс . . . . .	210
9 класс . . . . .	214
<b>Задачи Петербургских турниров юных математиков</b>	<b>215</b>
2018 год . . . . .	217
2017 год . . . . .	234
2016 год . . . . .	248
2015 год . . . . .	265

# Условия задач 2018 года

## Задачи 4 класса

### Задача 1. Где-то я это уже видел

- А. Сколько дат в году могли бы оказаться на экране цифровых часов в качестве времени? Например, 19 июня — 19:06, а 27 ноября времени не соответствует.
- В. Сколько дат в году могли бы появиться на экране цифровых часов, если разрешено использовать сначала месяца, а потом день? Например, 27 ноября тогда будет соответствовать время 11:27.
- С. Автомобильный номер в Ленинградской области имеет вид

× □ □ □ × ×	47 <sup>RUS</sup>
-------------	-------------------

Вместо квадратиков стоят цифры, а вместо крестиков — буквы русского алфавита, заглавные варианты которых похожи на какие-либо буквы английского алфавита (например, такие буквы — А, Т или У). На скольких номерах в Ленинградской области есть ровно одна гласная? А ровно две гласных?

### Задача 2. Напрасно называют север крайним

- А. Один коротышка с двумя ногами поехал кататься на велосипеде. Но так как на дворе была зима, —10 градусов, он отморозил себе одну ногу. Другой коротышка через месяц поехал кататься на велосипеде. Но на дворе по-прежнему была зима, уже —20 градусов, и он отморозил себе все имеющиеся ноги (их также было две).
- Сколько ног отморозит себе на 10- и на 20-градусном морозе туристическая группа из 40 коротышек? А их маленький серый кот, у которого ног изначально четыре? А речной рак, у которого восемь ног?



- В.** Барон Мюнхгаузен говорит, что обошёл вокруг света (то есть побывал на всех возможных долготах Земного шара) за 40 минут. При этом известно, что он не лжёт. Как такое могло произойти?
- С.** Однажды в стране Северной Болоторфии собрались построить дороги. Каждый город решили соединить дорогой с тремя другими городами, самыми близкими к нему. Может ли стать так, что найдутся города  $A$  и  $B$ , для которых, согласно указанному правилу, город  $A$  должен быть соединён с городом  $B$ , а город  $B$  с городом  $A$  — нет?

### Задача 3. Разрезания

- А.** Укажите, как разрезать произвольный квадрат на 7 многоугольников, у которых одинаковы как площади, так и суммарные длины сторон, лежащих на границе исходного квадрата.
- В.** Укажите, как разрезать изображённую на рисунке 2 фигуру на 6 равных фигур.

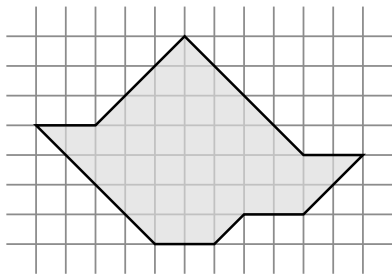


рисунок 2

- С.** Представьте, что одну из Египетских пирамид (Египетские пирамиды симметричны и имеют в основании квадрат) покрасили розовой краской (покрашены оказались её четыре стороны, но не основание). Как разрезать её на три части одинакового объёма, несущие на себе одинаковое количество краски?

### Задача 4. Летающий цирк

*Если вы скажете слово «матрас», он наденет ведро себе на голову.*

**А.** Если сказать мистеру Лэмберту слово «МАТРАС», он кричит „Караул!“, снимает перчатки, надевает на голову ведро, встаёт одной ногой в коробку из-под телевизора и поёт два куплета из песни про коня.

Если сказать мистеру Лэмберту слово «СТАРТ», он кричит „Караул!“, снимает перчатки, встаёт двумя ногами в коробку из-под телевизора и поёт один куплет из песни про коня.

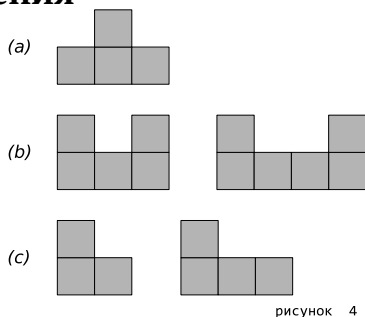
А что будет, если сказать мистеру Лэмберту слово «МАРС»?

**В.** У джентльмена есть 34 доллара, и он хочет купить себе шляпу. Продавец называет цену в 120 долларов, но джентльмен должен торговаться. Каждый раз, когда джентльмен торгуется, продавец сбавляет цену до среднего арифметического финансовых возможностей джентльмена и цены, названной на предыдущем шаге, — а джентльмен в это время оглядывает и находит одну долларовую монетку, лежащую на брусчатке. Сможет ли джентльмен когда-нибудь купить себе желанную шляпу?

**С. Тревор:** «Этот сконфуженный кот стоит 9600 рублей.»

**Джереми:** «Кот дешевле, поскольку Тревор в 4 раза преувеличивает каждое число, которое называет. Хотя он только что и сказал про стоимость кота в 2400 рублей, кот на самом деле стоит 150 рублей.» Подсчитайте, во сколько раз Джереми преуменьшает каждое произносимое число, и сколько на самом деле стоит сконфуженный кот.

## Задача 5. Мощения



**А.** Укажите, как замостить плоскость фигурой с рисунка 4(а).

**В.** Укажите способ замощения плоскости каждой из двух фигур на рисунке 4(б).

- С. Можно ли сложить квадрат какого-либо размера из деревянных плиток в форме фигур, изображённых на рисунке 4(с)? При этом необходимо пользоваться плитками обеих форм.

## Задача 6. Ужасный гадкий аккуратный подсчёт

- А. Из клетчатой бумаги вырезали прямоугольник размером  $4 \times 5$  клеток. Сколько на нём можно найти квадратов? А прямоугольников?
- В. Круг разделён на  $n$  секторов одинакового размера. Сколькими способами можно покрасить эти  $n$  секторов в  $n$  цветов, если две краски, получающиеся друг из друга вращением круга, считаются одинаковыми?
- С. Есть шесть цветов — красный, белый, синий, зелёный, чёрный, жёлтый. Нам хочется составить из них всевозможные триколоры (то есть флаги, состоящие из трёх горизонтальных цветных полос, как российский или немецкий). При этом если рядом оказываются две полосы одного цвета, они сливаются в одну, поэтому такой флаг не считается триколором. А вот флаг вроде «белый — синий — белый» — считается. Так сколько же триколоров можно составить?

## Задачи 5 класса

### Задача 1. Летающий цирк

*Если вы скажете слово «матрас», он наденет ведро себе на голову.*

- А. Если сказать мистеру Лэмберту слово «МАТРАС», он кричит „Караул!“, снимает перчатки, надевает на голову ведро, встаёт одной ногой в коробку из-под телевизора и поёт два куплета из песни про коня.

Если сказать мистеру Лэмберту слово «СТАРТ», он кричит „Караул!“, снимает перчатки, встаёт двумя ногами в коробку из-под телевизора и поёт один куплет из песни про коня.

А что будет, если сказать мистеру Лэмберту слово «МАРС»?

- В. У джентльмена есть 34 доллара, и он хочет купить себе шляпу. Продавец называет цену в 120 долларов, но джентльмен должен торговаться. Каждый раз, когда джентльмен торгуется, продавец сбавляет цену до среднего арифметического финансовых возможностей

джентльмена и цены, названной на предыдущем шаге, — а джентльмен в это время оглядывает и находит одну долларовую монетку, лежащую на брусчатке. Сможет ли джентльмен когда-нибудькупить себе желанную шляпу?

**С. Тревор:** «Этот сконфуженный кот стоит 9600 рублей.»

**Джереми:** «Кот дешевле, поскольку Тревор в 4 раза преувеличивает каждое число, которое называет. Хотя он только что и сказал про стоимость кота в 2400 рублей, кот на самом деле стоит 150 рублей.» Подсчитайте, во сколько раз Джереми преуменьшает каждое произносимое число, и сколько на самом деле стоит сконфуженный кот.

## Задача 2. Рукопожатия

- А.** Тридцать пять восьминогих существ — 18 крабов и 17 пауков — встали в хоровод, имеющий форму восьмёрки. Это значит, что существо, стоящее в центре этой восьмёрки, держит за лапы четверых своих соседей (благо, лап у него восемь, ему хватит). Известно, что каждый краб держится за лапы исключительно с пауками. Кто стоит в центре восьмёрки — краб или паук?
- В.** В компании работает двадцать шесть человек, и каждый дружит ровно с пятью другими. После подведения итогов государственной лотереи оказалось, что у каждого сотрудника найдётся друг или друг его друга (это может быть и сам сотрудник: нетрудно понять, что он является другом всех своих друзей), выигравший в лотерею машину. Докажите, что хотя бы два человека в компании выиграли машины.
- С.** Известно, что в Авиаландии пять городов: Гирфорд, Вингбург, Флэпстон, Пайлот-Бэй и Фьюлтэнк. Из каждого города летает шесть авиарейсов, внутренних или международных. Докажите, что за границы Авиаландии летает чётное количество авиарейсов.

## Задача 3. Современная мебельная фабрика

- А.** Восемь ящиков экспериментального письменного стола расположены по кругу. Каждый ящик может быть открыт или закрыт. Стол устроен так, что можно одновременно изменять состояние пары ящиков, между которыми ровно два других ящика — то есть можно либо открыть два сразу, либо закрыть два сразу, либо открыть

один, закрыв другой.

У стола на витрине открыты два противоположных ящика. Покажите, как за 4 действия закрыть их оба.

- В.** В понедельник перед обедом обыкновенный мебельщик Сергей растворил пачку красителя для шкафов в десятилитровом ведре воды. В обед обиженный на начальство фабрики Фёдор в отчаянии вылил из ёмкости 4 литра раствора, долил 4 литра воды и тщательно размешал (чтобы замести следы).

На следующий день Сергей снова растворил пачку красителя в 10 литрах воды. На этот раз Фёдор вылил из ведра 2 литра раствора, долил 2 литра воды, тщательно размешал — и повторил ту же последовательность действий ещё раз. В какой из дней в ведре осталось больше красителя?

- С.** Экспериментальный стул с использованием нанотехнологий (одна из инноваций заключается, например, в том, что у такого стула ровно 720 ножек) падает с лестницы (в качестве испытания, разумеется). Выяснилось, что при падении он потерял в три раза меньше ножек, чем у него бы осталось, потеряй он в три раза меньше ножек, чем у него осталось сейчас. Так сколько же ножек осталось у стула?

## Задача 4. Игры

- А.** Двое по очереди вырезают из клетчатого прямоугольника  $5 \times 2018$  фигуру, изображённую на рисунке 3(a) — при этом её можно отражать и вращать. Проигрывает тот, кто не может вырезать фигуру в очередной раз. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

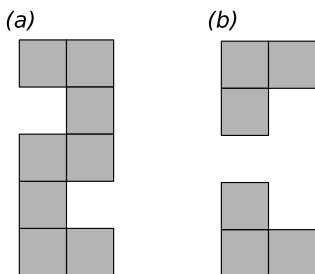


рисунок 3

- В.** Клетки прямоугольника  $1 \times 303$  пронумерованы от 1 до 303 слева направо. В клетке №2 стоит фишка первого игрока, а в клетке №1 —

второго игрока. Каждый игрок может делать ходы двух типов:

\* из клетки под номером  $k$  в клетку  $k + 1$ , если там не стоит фишка другого игрока;

\* из клетки под номером  $k$  в клетку  $k + 2m$ , если  $m$  — натуральное число, и в клетке номер  $k + m$  сейчас стоит фишка другого игрока (то есть, фишку соперника можно «перепрыгнуть»).

Выигрывает тот, чья фишка первой окажется в клетке № 303. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

- С. Двое по очереди вырезают из клетчатого квадрата  $4 \times 4$  уголки из трёх клеток, причём первый может вырезать только уголки, ориентированные как буква Г, а второй — только уголки, ориентированные как буква L (см. рис. 3(b)). Проигрывает тот, кто не может вырезать очередной уголок. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

## Задача 5. Прогрессивное сложение

В свободных школах, не имеющих предрассудков, решили складывать числа, просто приписывая их друг к другу. Мы будем обозначать это действие значком  $\oplus$ : например,  $2 \oplus 2 = 22$ ,  $2000 \oplus 2000 = 20002000$ .

В обычной жизни, в каком порядке числа ни складывай, результат остаётся неизменным:  $2 + 3 + 5 = 5 + 3 + 2$ . Однако, если выполнять с числами действие  $\oplus$ , результат может изменяться в зависимости от порядка чисел:  $2 \oplus 3 \oplus 5 = 235 \neq 532 = 5 \oplus 3 \oplus 2$ .

А. Даны числа 95 и 500. В каком порядке их нужно сложить, чтобы результат получился больше?

В. Даны три произвольных числа  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ . В каком порядке нужно выполнять с ними действие  $\oplus$ , чтобы получить наибольший возможный результат?

С. Бывает ли так, что  $P + Q > P \oplus Q$ ?

## Задача 6. Мощения

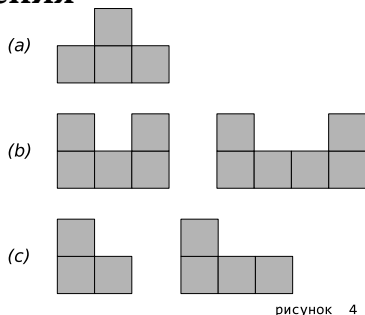


рисунок 4

- А. Укажите, как замостить плоскость фигурой с рисунка 4(а).
- В. Укажите способ замощения плоскости каждой из двух фигур на рисунке 4(б).
- С. Можно ли сложить квадрат какого-либо размера из деревянных плиток в форме фигур, изображённых на рисунке 4(с)? При этом необходимо пользоваться плитками обеих форм.

## Задачи 6 класса

### Задача 1. Клиренсы

- А. Диаметр колеса велосипеда — 74 см. На высоте центра колеса расположена каретка — узел, вокруг которого крутятся педали. Расстояние от каретки до педали — 175 мм. Каково минимальное расстояние от педали до земли (если на велосипеде едут по прямой, не наклоняясь)? Размёрами педалей пренебречь.
- В. Расстояние между соседними ножками стула — 50 см. К ножкам стула прикрепили колёсики и стали втаскивать его за верёвку по стене многоэтажки (которая имеет форму куба) так, что стул едет по стене колёсиками. Каково должно быть расстояние от сидения стула до земли, чтобы он смог въехать со стены многоэтажки на её крышу, не поцарапав нижнюю сторону сиденья?
- С. Автобус с диаметром колёс 1 метр и колёсной базой 10.5 метров (так называют расстояние между передней осью и задней) стоит на платформе Маленького принца, диаметр которой 20 метров. Каким должен быть дорожный просвет (расстояние от пола до земли) у автобуса, чтобы он не царапал днищем грунт?

## Задача 2. Разрезания

- А. Укажите, как разрезать произвольный квадрат на 7 многоугольников, у которых одинаковы как площади, так и суммарные длины сторон, лежащих на границе исходного квадрата.
- В. Укажите, как разрезать изображённую на рисунке 2 фигуру на 6 равных фигур.

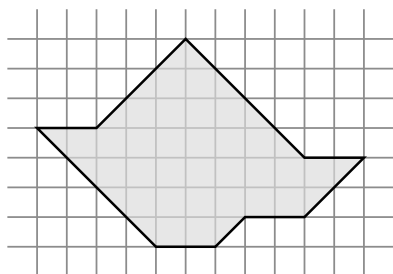


рисунок 2

- С. Представьте, что одну из Египетских пирамид (Египетские пирамиды симметричны и имеют в основании квадрат) покрасили розовой краской (покрашены оказались её четыре стороны, но не основание). Как разрезать её на три части одинакового объёма, несущие на себе одинаковое количество краски?

## Задача 3. Игры

- А. Двое по очереди вырезают из клетчатого прямоугольника  $5 \times 2018$  фигуру, изображённую на рисунке 3(a) — при этом её можно отражать и вращать. Проигрывает тот, кто не может вырезать фигуру в очередной раз. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

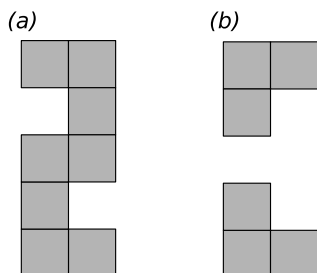


рисунок 3



**В.** Клетки прямоугольника  $1 \times 303$  пронумерованы от 1 до 303 слева направо. В клетке №2 стоит фишка первого игрока, а в клетке №1 — второго игрока. Каждый игрок может делать ходы двух типов:

\* из клетки под номером  $k$  в клетку  $k + 1$ , если там не стоит фишка другого игрока;

\* из клетки под номером  $k$  в клетку  $k + 2m$ , если  $m$  — натуральное число, и в клетке номер  $k + m$  сейчас стоит фишка другого игрока (то есть, фишку соперника можно «перепрыгнуть»).

Выигрывает тот, чья фишка первой окажется в клетке № 303. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

**С.** Двое по очереди вырезают из клетчатого квадрата  $4 \times 4$  уголки из трёх клеток, причём первый может вырезать только уголки, ориентированные как буква Г, а второй — только уголки, ориентированные как буква L (см. рис. 3(b)). Проигрывает тот, кто не может вырезать очередной уголок. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

## Задача 4. Модельки

**А.** Вовочка подумал: «Если автомобиль „Жигули“ весит 1200 килограммов, а мама подарила мне модельку масштаба  $1 : 43$ , сделанную из тех же материалов, что и полноценная машина, то моделька должна весить  $1200/43 \approx 28$  килограммов... Однако она ощутимо легче моего кота, про которого мама недавно сказала, что он толстый, потому что преодолел отметку в 6 кило. Где же логика?»

Помогите Вовочке разобраться — почему моделька на самом деле не так тяжела?

**В.** В 1791 году единица длины **метр** была определена как одна сорока-миллионная часть Парижского меридиана. А в современном спорте популярно измерение не скорости, а *темпа* бегуна — сколько минут он тратит на преодоление километра.

Самый быстрый темп, которого умеет достигать моделька самолёта — 0.54 мин/км. За сколько часов такая моделька долетит вдоль Парижского меридиана от Северного полюса до Южного и обратно?

**С.** Можно ли собрать из шестерёнок такую систему, что в ней найдутся две шестерёнки А и В, и при вращении А в движение приводятся все

остальные шестерёнки, а при вращении В — нет?

## Задача 5. Напрасно называют север крайним

**А.** Один коротышка с двумя ногами поехал кататься на велосипеде. Но так как на дворе была зима,  $-10$  градусов, он отморозил себе одну ногу. Другой коротышка через месяц поехал кататься на велосипеде. Но на дворе по-прежнему была зима, уже  $-20$  градусов, и он отморозил себе все имеющиеся ноги (их также было две).

Сколько ног отморозит себе на  $10$ - и на  $20$ -градусном морозе туристическая группа из  $40$  коротышек? А их маленький серый кот, у которого ног изначально четыре? А речной рак, у которого восемь ног?

**В.** Барон Мюнхгаузен говорит, что обошёл вокруг света (то есть побывал на всех возможных долготах Земного шара) за  $40$  минут. При этом известно, что он не лжёт. Как такое могло произойти?

**С.** Однажды в стране Северной Болоторфии собрались построить дороги. Каждый город решили соединить дорогой с тремя другими городами, самыми близкими к нему. Может ли стать так, что найдутся города  $A$  и  $B$ , для которых, согласно указанному правилу, город  $A$  должен быть соединён с городом  $B$ , а город  $B$  с городом  $A$  — нет?

## Задача 6. Где-то я это уже видел

**А.** Сколько дат в году могли бы оказаться на экране цифровых часов в качестве времени? Например,  $19$  июня —  $19:06$ , а  $27$  ноября времени не соответствует.

**В.** Сколько дат в году могли бы появиться на экране цифровых часов, если разрешено использовать сначала месяца, а потом день? Например,  $27$  ноября тогда будет соответствовать время  $11:27$ .

**С.** Автомобильный номер в Ленинградской области имеет вид

$\times$ <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> $\times$ $\times$	$47^{\text{RUS}}$
---	-------------------

Вместо квадратиков стоят цифры, а вместо крестиков — буквы русского алфавита, заглавные варианты которых похожи на какие-либо буквы английского алфавита (например, такие буквы — А, Т или У).

На скольких номерах в Ленинградской области есть ровно одна гласная? А ровно две гласных?

## Задача 7. Ужасный гадкий аккуратный подсчёт

- А. Из клетчатой бумаги вырезали прямоугольник размером  $4 \times 5$  клеток. Сколько на нём можно найти квадратов? А прямоугольников?
- В. Круг разделён на  $n$  секторов одинакового размера. Сколькими способами можно покрасить эти  $n$  секторов в  $n$  цветов, если две раскраски, получающиеся друг из друга вращением круга, считаются одинаковыми?
- С. Есть шесть цветов — красный, белый, синий, зелёный, чёрный, жёлтый. Нам хочется составить из них всевозможные триколоры (то есть флаги, состоящие из трёх горизонтальных цветных полос, как российский или немецкий). При этом если рядом оказываются две полосы одного цвета, они сливаются в одну, поэтому такой флаг не считается триколором. А вот флаг вроде «белый — синий — белый» — считается. Так сколько же триколоров можно составить?

## Задача 8. Фургончик

- А. Длины стен кузова нового фургона, который строит себе мороженщик Саша, в метрах выражаются двумя различными простыми числами. Известно, что если удлинить каждую из стен на 1 метр, площадь фургона увеличится на  $15 \text{ м}^2$ . Найдите размеры фургона.
- В. В сашином фургоне родилась сороконожка (её ноги пронумерованы от 1 до 40). Она хочет сделать первый шаг — и переставляет первую ногу. Вторым шагом она переставляет все ноги, номера которых делятся на 2. Третьим — все ноги, номера которых делятся на 3 и которые не были переставлены ранее. Сколько ног ей теперь осталось переставить, чтобы окончательно сдвинуться с места?
- С. Однажды утром мороженщик Саша отправился развозить мороженое на своём новом фургоне. Он обслуживает семь городов —  $A, B, C, D, E, F$  и  $G$  — и эти города в каком-то порядке стоят вдоль одного прямого шоссе. Федя выехал из города  $A$  и проехал 18 километров до  $B$ . Потом — 10.5 километров до  $C$ . Затем — 27 километров до  $D$ , 15 километров до  $E$  и 19.5 километров до  $F$ . Наконец — 12 километров

до  $G$ . Посмотрев вечером в атлас, Саша к своему удивлению узнал, что расстояние от  $A$  до  $G$  по шоссе указано равным 41 км. Докажите, что информация в атласе неверна.

## Задачи 7 класса

### Задача 1. Современная мебельная фабрика

**A.** Восемь ящиков экспериментального письменного стола расположены по кругу. Каждый ящик может быть открыт или закрыт. Стол устроен так, что можно одновременно изменять состояние пары ящиков, между которыми ровно два других ящика — то есть можно либо открыть два сразу, либо закрыть два сразу, либо открыть один, закрыв другой.

У стола на витрине открыты два противоположных ящика. Покажите, как за 4 действия закрыть их оба.

**B.** В понедельник перед обедом обыкновенный мебельщик Сергей растворил пачку красителя для шкафов в десятилитровом ведре воды. В обед обиженный на начальство фабрики Фёдор в отчаянии вылил из ёмкости 4 литра раствора, долил 4 литра воды и тщательно размешал (чтобы замести следы).

На следующий день Сергей снова растворил пачку красителя в 10 литрах воды. На этот раз Фёдор вылил из ведра 2 литра раствора, долил 2 литра воды, тщательно размешал — и повторил ту же последовательность действий ещё раз. В какой из дней в ведре осталось больше красителя?

**C.** Экспериментальный стул с использованием нанотехнологий (одна из инноваций заключается, например, в том, что у такого стула ровно 720 ножек) падает с лестницы (в качестве испытания, разумеется). Выяснилось, что при падении он потерял в три раза меньше ножек, чем у него бы осталось, потеряй он в три раза меньше ножек, чем у него осталось сейчас. Так сколько же ножек осталось у стула?

### Задача 2. Прогрессивное сложение

В свободных школах, не имеющих предрассудков, решили складывать числа, просто приписывая их друг к другу. Мы будем обозначать это действие значком  $\oplus$ : например,  $2 \oplus 2 = 22$ ,  $2000 \oplus 2000 = 20002000$ .

В обычной жизни, в каком порядке числа ни складывай, результат остаётся неизменным:  $2 + 3 + 5 = 5 + 3 + 2$ . Однако, если выполнять с числами действие  $\oplus$ , результат может изменяться в зависимости от порядка чисел:  $2 \oplus 3 \oplus 5 = 235 \neq 532 = 5 \oplus 3 \oplus 2$ .

- А.** Даны числа 95 и 500. В каком порядке их нужно сложить, чтобы результат получился больше?
- В.** Даны три произвольных числа  $P, Q, R$ . В каком порядке нужно выполнять с ними действие  $\oplus$ , чтобы получить наибольший возможный результат?
- С.** Определим «прогрессивную разность»:  $a \ominus b$  — это такое число  $c$ , что  $b \oplus c = a$ . Приведите пример чисел  $a$  и  $b$  таких, что их разность  $a \ominus b$  не определена (нужного числа  $c$  не найдётся).

### Задача 3. На салфетке

- А.** Укажите, как нарисовать «одним росчерком пера», то есть не отрывая ручки от бумаги и не проходя по одной линии дважды, (а) олимпийские кольца (б) «наклонный квадрат» со стороной 4 (см. рисунок 5).

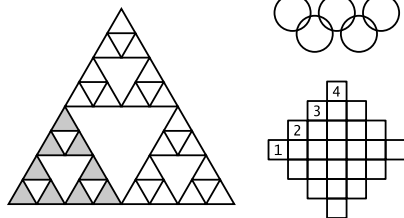


рисунок 5

- В.** Треугольник Серпинского степени 1 — это просто треугольник. Чтобы получить треугольник Серпинского степени  $n + 1$ , нужно поставить «друг на друга» три треугольника Серпинского степени  $n$ . На рисунке 5 изображён треугольник Серпинского степени 4, а цветом выделен треугольник Серпинского степени 3. Посчитайте, сколько узлов (точек, где пересекаются два и более непараллельных отрезка) в треугольнике Серпинского степени  $n$ . Посчитайте также, сколько отрезков длины 1 составляют «наклонный квадрат» со стороной  $n$ .

- С. Укажите, как нарисовать одним росчерком пера треугольник Серпинского степени 4, изображённый на рисунке Т-5.

## Задача 4. Не модельная, а модальная!

Пусть есть событие  $X$ , которое может происходить или не происходить в зависимости от того, какой сегодня день. Например, событие  $X$  = «сегодня суббота» случается раз в семь дней, а событие «сегодня я смотрел на часы» — каждый день.

Имеются два символа,  $\square$  и  $\nabla$ , которые рассказывают что-то о разных событиях. Так, фраза « $\square X$ » означает «начиная с сегодняшнего дня каждый день случается событие  $X$ ». Фраза « $\nabla X$ » означает «в будущем найдётся день, когда случится событие  $X$ ».

Два символа, упомянутых нами, можно комбинировать. Легко понять, что фраза « $\nabla \square X$ » значит «в будущем найдётся день, начиная с которого ежедневно будет происходить событие  $X$ ». А фраза « $\square \square X$ » значит то же самое, что и « $\square X$ » (убедитесь в этом сами). Фразы, значащие одно и то же, будем называть эквивалентными.

- А. Верно ли утверждение « $\square \nabla$  сегодня суббота»? Что вообще значит фраза « $\square \nabla X$ »?
- В. Докажите, что фразы « $\square \nabla \square X$ » и « $\nabla \square X$ » эквивалентны.
- С. Сколько вообще существует попарно неэквивалентных фраз вида « $\underline{\phantom{X}}$ » (вместо подчёркивания стоит последовательность из символов  $\square$  и  $\nabla$ )?

## Задача 5. Без пробуксовки

- А. Легковая машина с колёсной базой (так называют расстояние между передней и задней осью) 5 метров повернула переднее левое колесо на  $30^\circ$  влево, при этом заднее левое колесо осталось в исходном положении, а правые колёса повернулись так, чтобы машина могла ездить без пробуксовки. С повернутыми таким образом колёсами машина стала ездить по окружности. По окружности какого радиуса ездит заднее левое колесо?
- В. Погрузчик в супермаркете с колёсной базой 1.8 метра повернул переднее левое колесо на  $45^\circ$  влево, а заднее левое — на столько же в противоположном направлении. Остальные колёса повернулись

так, чтобы погрузчик мог ездить без пробуксовки. С повёрнутыми таким образом колёсами погрузчик стал ездить по окружности. Укажите точку, вокруг которой он ездит.

- С. Расстояние между передней и средней осью трёхосного автобуса — 9 метров, а между средней и задней — 3 метра. Переднее левое колесо повернулось на  $60^\circ$  влево, среднее левое осталось в прямом положении. На сколько градусов и куда нужно повернуться заднему левому колесу, чтобы автобус смог поехать без пробуксовки?

## Задача 6. Как провожают транспортёры...

Транспортёром будем называть движущуюся ленту, на которой можно перемещать предметы (все видели такую на кассе в «Пятёрочке»; ещё её можно сравнить с траволатором на ст. м. «Спортивная»).

- А. Если транспортёр движется со скоростью  $v$  м/с, то лежащий на нём питон проезжает мимо неподвижного наблюдателя за 14 секунд. Давайте возьмём питона–детёныша (его длина составляет  $\frac{3}{4}$  от длины взрослого питона), в шесть раз более медленный транспортёр, а также заставим наблюдателя идти со скоростью  $\frac{1}{3}v$  м/с навстречу транспортёру. За какое время детёныш питона пронесётся мимо наблюдателя?
- В. Два кубика размером  $5 \times 5 \times 5$  см едут по транспортёру, причём расстояние между ними равняется 10 см. С данного транспортёра они попадают на следующий, в два раза более быстрый, и дальше едут по нему. Каково расстояние между ними теперь?
- С. В отдел приёма песка фабрики «Весёлый Песочник» привезли 1'200 кг песка. Из отдела приёма в отдел первичной очистки на фабрике идёт два транспортёра: один переносит 500 граммов песка в секунду, а другой, новый, — 1 кг песка в секунду. Как поделить песок между этими двумя транспортёрами так, чтобы перевезти весь песок из одного отдела в другой за наименьшее время?

## Задача 7. Одновременное вычитание

- А. На доске написаны пять чисел, сумма которых делится на три. Решается одновременно уменьшать на единицу три из написанных на доске чисел. Всегда ли можно добиться того, чтобы на доске в итоге оказалось пять нулей?

- В.** На плоскости расположено несколько точек, каждой из которых приписан *вес* — целое число. При этом известно, что сумма весов всех точек равна нулю. Точки можно соединять кривыми, у каждой из которых есть *цена*. Если две точки соединены кривой с ценой  $w$  ( $w$  — целое число), то к весу одной из них прибавляется  $w$ , а из веса другой вычитается  $w$  (куда именно прибавлять, а откуда вычитать, можно решать самому). Докажите, что можно соединить точки кривыми с какими-то ценами так, чтобы веса всех точек оказались нулевыми.
- С.** В стране несколько городов, между ними проложены дороги. Для каждой дороги указаны направление (все дороги односторонние) и *вес* — натуральное число. Известно, что для каждого города сумма весов входящих в него дорог равна сумме весов исходящих. Докажите, что несколько машин (на номере каждой из которых написано натуральное число) могли проехать каждая по кругу через несколько городов так, что вес каждой дороги оказался равен сумме номеров машин, побывавших на ней.

## Задача 8. Сетки на плоскости

- А.** Если замостить плоскость равносторонними треугольниками одного размера, то их стороны образуют треугольную сетку (в её форме также обычно строят карточные домики). В треугольной сетке есть три направления рёбер — они соответствуют сторонам складываемых треугольников. Докажите, что любой кратчайший путь по треугольной сетке от одного её узла к другому использует рёбра максимум двух направлений из трёх.
- В.** В деревне Малые Пауки поставили поперёк реки рыболовную сеть с квадратными ячейками, размером  $m \times n$  ячеек. Окунь Виталий умеет сгрызать узлы в сетке, но, так как вода мутная, он не видит, какой именно узел грызёт, то есть каждый раз выгрызает случайный из узлов. Сколько узлов ему нужно сгрызть, чтобы сетка гарантированно развалилась хотя бы на две части?
- С.** Завхоз офисного здания, на третьем этаже которого есть бесконечно длинный и бесконечно широкий коридор, заказал в ООО „Странные ванны“ бесконечно много четырёхугольных кафельных плиток одинаковой формы и размера (при этом четырёхугольник не обязан быть ни прямоугольником, ни даже выпуклым). Докажите,



что какой бы формы ни были плитки, ими всё равно можно покрыть весь пол в коридоре.

## Задача 9. Ужасный гадкий аккуратный подсчёт

- А.** Круг разделён на  $n$  секторов одинакового размера. Сколькими способами можно покрасить эти  $n$  секторов в  $n$  цветов, если две раскраски, получающиеся друг из друга вращением круга, считаются одинаковыми?
- В.** Есть шесть цветов — красный, белый, синий, зелёный, чёрный, жёлтый. Нам хочется составить из них всевозможные триколоры (то есть флаги, состоящие из трёх горизонтальных цветных полос, как российский или немецкий). При этом если рядом оказываются две полосы одного цвета, они сливаются в одну, поэтому такой флаг не считается триколором. А вот флаг вроде «белый — синий — белый» — считается. Так сколько же триколоров можно составить?
- С.** Дан кубик. Сколькими способами можно покрасить его грани в шесть цветов (по одному на грань), если две раскраски, получаемые друг из друга вращением кубика, считаются одинаковыми?

## Задача 10. Средние арифметические

Напомним: среднее арифметическое набора чисел  $a_1 \dots a_n$  вычисляется по формуле

$$\frac{a_1 + \dots + a_n}{n}.$$

- А.** Придумайте четыре набора по пять чисел каждый так, чтобы максимум средних арифметических этих наборов был больше, чем среднее арифметическое наибольших чисел этих наборов.
- В.** В первый класс школы №265 поступило 120 детей ростом соответственно 101, 102, 103, ..., 220 сантиметров. Завуч хочет распределить их на 4 класса по 30 человек так, чтобы, если в каждом классе взять рост самого низкого ученика, среднее арифметическое полученных четырёх чисел было наибольшим. Как ей это сделать?
- С.** В первый класс школы №235 поступило 80 детей ростом соответственно 51, 52, 53, ..., 130 сантиметров. Завуч хочет распределить их на 4 класса по 20 человек так, чтобы, если в каждом классе взять

средний арифметический рост его учеников, минимум полученных четырёх чисел был наибольшим. Как ей это сделать?

## Задачи 8 класса

### Задача 1. У магазина

**А.** Два продавца в магазине, Фёдор и Кирилл, увеличивают все числа, которые называют, в несколько раз.

**Фёдор:** Кирилл умножает числа, которые произносит, на 144, так что не паникуйте, обсуждая с ним цены.

**Кирилл:** А ты когда вчера сказал, что учебник истории стоит 43200 рублей, покупатели в обморок упали!

**Игорь Евгеньевич, директор магазина:** Вы так забавно ссоритесь! Причём если спросить у вас, сколько стоит учебник, вы скажете одну и ту же сумму.

Так во сколько же раз увеличивают числа продавцы — и сколько стоит учебник по истории?

**В.** Злоумышленник пришёл на парковку магазина и затёр по одной цифре на номерном знаке каждой из стоящих там машин. Он не знал, что числа на всех номерах машин в стране делятся на 99. Докажите, что даже после его пакостей можно однозначно восстановить стёртую цифру на номере каждой машины.

**С.** Покупатель и продавец в магазине торгуются: покупатель хочет купить товар по одной цене, а продавец — продать по другой (причём не обязательно продавец называет бóльшую сумму; ему важнее не получить больше прибыли, а настоять на своём). Цены, конечно же, целые и неотрицательные. Торг происходит так: если сумма, названная продавцом, больше названной покупателем, то он вычитает из своей цены покупательскую. В противном случае цена, названная продавцом, вычитается из названной покупателем. Так происходит, пока один из участников торга не назовёт нулевую цену.

(а) Любой ли торг завершится? (б) Покупатель и продавец называют цены, не превосходящие 20. При каких значениях цен торг будет наиболее долгим?

## Задача 2. Ужасный гадкий аккуратный подсчёт

- А. Круг разделён на  $n$  секторов одинакового размера. Сколькими способами можно покрасить эти  $n$  секторов в  $n$  цветов, если две раскраски, получающиеся друг из друга вращением круга, считаются одинаковыми?
- В. Есть шесть цветов — красный, белый, синий, зелёный, чёрный, жёлтый. Нам хочется составить из них всевозможные триколоры (то есть флаги, состоящие из трёх горизонтальных цветных полос, как российский или немецкий). При этом если рядом оказываются две полосы одного цвета, они сливаются в одну, поэтому такой флаг не считается триколором. А вот флаг вроде «белый — синий — белый» — считается. Так сколько же триколоров можно составить?
- С. Дан кубик. Сколькими способами можно покрасить его грани в шесть цветов (по одному на грань), если две раскраски, получаемые друг из друга вращением кубика, считаются одинаковыми?

## Задача 3. Не модельная, а модальная!

Пусть есть событие  $X$ , которое может происходить или не происходить в зависимости от того, какой сегодня день. Например, событие  $X$  = «сегодня суббота» случается раз в семь дней, а событие «сегодня я смотрел на часы» — каждый день.

Имеются два символа,  $\square$  и  $\nabla$ , которые рассказывают что-то о разных событиях. Так, фраза « $\square X$ » означает «начиная с сегодняшнего дня каждый день случается событие  $X$ ». Фраза « $\nabla X$ » означает «в будущем найдётся день, когда случится событие  $X$ ».

Два символа, упомянутых нами, можно комбинировать. Легко понять, что фраза « $\nabla \square X$ » значит «в будущем найдётся день, начиная с которого ежедневно будет происходить событие  $X$ ». А фраза « $\square \square X$ » значит то же самое, что и « $\square X$ » (убедитесь в этом сами). Фразы, значащие одно и то же, будем называть эквивалентными.

- А. Верно ли утверждение « $\square \nabla$  сегодня суббота»? Что вообще значит фраза « $\square \nabla X$ »?
- В. Докажите, что фразы « $\square \nabla \square X$ » и « $\nabla \square X$ » эквивалентны.

- С. Сколько вообще существует попарно неэквивалентных фраз вида «X» (вместо подчёркивания стоит последовательность из символов  $\square$  и  $\nabla$ )?

## Задача 4. Катим круг

В «нижней» точке  $P$  окружности радиуса  $R$  её касается круг радиуса  $\frac{R}{2}$ , «нижняя» точка которого, в свою очередь, отмечена (см. рисунок). Круг начинают «вкатывать» вверх по окружности так, что в точке соприкосновения они никогда не скользят друг относительно друга.

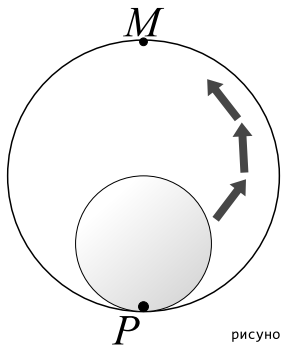


рисунок 1

- А. Докажите, что когда круг проедет пол-оборота по окружности и будет касаться её в точке  $M$ , то его отмеченная точка окажется там же, в точке  $M$ .
- В. Докажите, что в любой момент времени точка касания круга с окружностью и отмеченная точка круга находятся на одной горизонтальной прямой.
- С. Докажите, что отмеченная точка перемещается строго по вертикальному отрезку.

## Задача 5. Средние арифметические

Напомним: среднее арифметическое набора чисел  $a_1 \dots a_n$  вычисляется по формуле

$$\frac{a_1 + \dots + a_n}{n}.$$

- А. Придумайте четыре набора по пять чисел каждый так, чтобы максимум средних арифметических этих наборов был больше, чем среднее арифметическое наибольших чисел этих наборов.

- В.** В первый класс школы №265 поступило 120 детей ростом соответственно 101, 102, 103, ..., 220 сантиметров. Завуч хочет распределить их на 4 класса по 30 человек так, чтобы, если в каждом классе взять рост самого низкого ученика, среднее арифметическое полученных четырёх чисел было наибольшим. Как ей это сделать?
- С.** В первый класс школы №235 поступило 80 детей ростом соответственно 51, 52, 53, ..., 130 сантиметров. Завуч хочет распределить их на 4 класса по 20 человек так, чтобы, если в каждом классе взять средний арифметический рост его учеников, минимум полученных четырёх чисел был наибольшим. Как ей это сделать?

## Задача 6. Игры

- А.** Двое по очереди вырезают из клетчатого прямоугольника  $5 \times 2018$  фигуру, изображённую на рисунке 3(a) — при этом её можно отражать и вращать. Проигрывает тот, кто не может вырезать фигуру в очередной раз. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

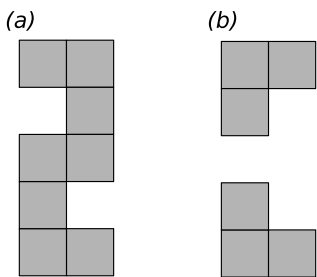


рисунок 3

- В.** Клетки прямоугольника  $1 \times 303$  пронумерованы от 1 до 303 слева направо. В клетке №2 стоит фишка первого игрока, а в клетке №1 — второго игрока. Каждый игрок может делать ходы двух типов:

- \* из клетки под номером  $k$  в клетку  $k + 1$ , если там не стоит фишка другого игрока;

- \* из клетки под номером  $k$  в клетку  $k + 2m$ , если  $m$  — натуральное число, и в клетке номер  $k + m$  сейчас стоит фишка другого игрока (то есть, фишку соперника можно «перепрыгнуть»).

Выигрывает тот, чья фишка первой окажется в клетке № 303. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

- С. Двое по очереди вырезают из клетчатого квадрата  $4 \times 4$  уголки из трёх клеток, причём первый может вырезать только уголки, ориентированные как буква Г, а второй — только уголки, ориентированные как буква L (см. рис. 3(b)). Проигрывает тот, кто не может вырезать очередной уголок. У кого из игроков есть выигрышная стратегия?

## Задача 7. Об одной задаче классификации

- А. Полосой будем называть часть плоскости, заключённую между двумя параллельными прямыми. Ширина полосы — расстояние между ограничивающими её прямыми. Пусть на плоскости даны два непересекающихся круга. Покажите, как с помощью линейки без делений и циркуля отделить их друг от друга полосой максимальной ширины.
- В. В условиях пункта А отделите полосой максимальной ширины два непересекающихся одинаково ориентированных квадрата на плоскости.
- С. В условиях пункта А отделите полосой максимальной ширины два произвольных квадрата на плоскости.

## Задача 8. Одновременное вычитание

- А. На доске написаны пять чисел, сумма которых делится на три. Разрешается одновременно уменьшать на единицу три из написанных на доске чисел. Всегда ли можно добиться того, чтобы на доске в итоге оказалось пять нулей?
- В. На плоскости расположено несколько точек, каждой из которых приписан *вес* — целое число. При этом известно, что сумма весов всех точек равна нулю. Точки можно соединять кривыми, у каждой из которых есть *цена*. Если две точки соединены кривой с ценой  $w$  ( $w$  — целое число), то к весу одной из них прибавляется  $w$ , а из веса другой вычитается  $w$  (куда именно прибавлять, а откуда вычитать, можно решать самому). Докажите, что можно соединить точки кривыми с какими-то ценами так, чтобы веса всех точек оказались нулевыми.
- С. В стране несколько городов, между ними проложены дороги. Для каждой дороги указаны направление (все дороги односторонние)

и вес — натуральное число. Известно, что для каждого города сумма весов входящих в него дорог равна сумме весов исходящих. Докажите, что несколько машин (на номере каждой из которых написано натуральное число) могли проехать каждая по кругу через несколько городов так, что вес каждой дороги оказался равен сумме номеров машин, побывавших на ней.

## Задача 9. На салфетке

- А. Укажите, как нарисовать «одним росчерком пера», то есть не отрывая ручки от бумаги и не проходя по одной линии дважды, (а) олимпийские кольца (б) «наклонный квадрат» со стороной 4 (см. рисунок 5).

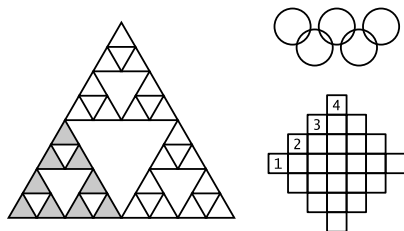


рисунок 5

- В. Треугольник Серпинского степени 1 — это просто треугольник. Чтобы получить треугольник Серпинского степени  $n + 1$ , нужно поставить «друг на друга» три треугольника Серпинского степени  $n$ . На рисунке 5 изображён треугольник Серпинского степени 4, а цветом выделен треугольник Серпинского степени 3. Посчитайте, сколько узлов (точек, где пересекаются два и более непараллельных отрезка) в треугольнике Серпинского степени  $n$ . Посчитайте также, сколько отрезков длины 1 составляют «наклонный квадрат» со стороной  $n$ .
- С. Укажите, как нарисовать одним росчерком пера треугольник Серпинского степени 4, изображённый на рисунке Т-5.

## Задача 10. Необходимости и достаточности

- А. Длина тела мышки — 10 сантиметров, а кошки — 55 сантиметров. Мышка пробегает 35 своих тел за секунду, а кошка — всего 9 своих тел за секунду. Догонит ли кошка мышку?

**В.** На одном болоте живут 100 ужасных Йожин. Председатель решил, что с этой ситуацией надо наконец разобраться — обезвредить Йожин и продать их в зоопарк. Известно, что Йожина можно обезвредить, только скинув на него с самолёта порошок. Председателю нужно выбрать, какой самолёт использовать: винтовой или реактивный.

Винтовой самолёт за один вылет осыпает порошком двух Йожин, но, чтобы окончательно обезвредить одного Йожина, нужно осыпать его трижды. Реактивный самолёт, в силу своей более высокой скорости, за один вылет осыпает порошком 5 Йожин, но, так как на каждого Йожина теперь попадает меньше порошка, для обезвреживания его нужно осыпать восемь раз.

Какой же самолёт эффективнее: какому потребуется меньше вылетов, чтобы обезвредить всех Йожин?

**С.** Несколько велосипедистов отправились в поход. За обедом они в сумме съедают 2 килограмма еды плюс 0.1 кг за каждый килограмм еды, который они везли на себе до этого. Например, если у них было 10 килограммов еды на всех, то на ближайшем обеде они съедят  $2 + 0.1 \cdot 10 = 3$  килограмма, а на следующем —  $2 + 0.1 \cdot (10 - 3) = 2.7$  килограммов. В походе планируется 30 обедов (а велосипедисты не завтракают и не ужинают). Сколько еды им нужно взять с собой, чтобы её хватило на весь поход (и в конце похода не осталось ничего лишнего)?

## Задача 11. Рукопожатия

**А.** Тридцать пять восьминогих существ — 18 крабов и 17 пауков — встали в хоровод, имеющий форму восьмиёрки. Это значит, что существо, стоящее в центре этой восьмиёрки, держит за лапы четверых своих соседей (благо, лап у него восемь, ему хватит). Известно, что каждый краб держится за лапы исключительно с пауками. Кто стоит в центре восьмиёрки — краб или паук?

**В.** В компании работает двадцать шесть человек, и каждый дружит ровно с пятью другими. После подведения итогов государственной лотереи оказалось, что у каждого сотрудника найдётся друг или друг его друга (это может быть и сам сотрудник: нетрудно понять, что он является другом всех своих друзей), выигравший в лотерею машину. Докажите, что хотя бы два человека в компании выиграли машины.



С. Известно, что в Авиаландии пять городов: Гирфорд, Вингбург, Флэпстон, Пайлот-Бэй и Фьюлтэнк. Из каждого города летает шесть авиарейсов, внутренних или международных. Докажите, что за границы Авиаландии летает чётное количество авиарейсов.

## Задача 12. Прогрессивное сложение

В свободных школах, не имеющих предрассудков, решили складывать числа, просто приписывая их друг к другу. Мы будем обозначать это действие значком  $\oplus$ : например,  $2 \oplus 2 = 22$ ,  $2000 \oplus 2000 = 20002000$ .

В обычной жизни, в каком порядке числа ни складывай, результат остаётся неизменным:  $2 + 3 + 5 = 5 + 3 + 2$ . Однако, если выполнять с числами действие  $\oplus$ , результат может изменяться в зависимости от порядка чисел:  $2 \oplus 3 \oplus 5 = 235 \neq 532 = 5 \oplus 3 \oplus 2$ .

- А. Даны числа 95 и 500. В каком порядке их нужно сложить, чтобы результат получился больше?
- В. Даны три произвольных числа  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ . В каком порядке нужно выполнять с ними действие  $\oplus$ , чтобы получить наибольший возможный результат?
- С. Определим «прогрессивную разность»:  $a \ominus b$  — это такое число  $c$ , что  $b \oplus c = a$ . Приведите пример чисел  $a$  и  $b$  таких, что их разность  $a \ominus b$  не определена (нужного числа  $c$  не найдётся).

## Задачи профильного варианта 7 класса

### Задача 1. Римская десятичная система счисления

*Интеллект человечества поддерживают лишь те неудобства, которые оно себе создаёт.*

Давайте добавим в знакомую нам десятичную систему счисления немного Древнего Рима. Значение числа по его записи мы теперь будем восстанавливать так: начиная с самого правого разряда, сравниваем  $k$ -ую цифру числа с  $k + 1$ -ой — и если более старшая цифра оказывается не меньше, то мы прибавляем к результату умножения её на соответствующую степень десятки число, которое получено нами при «раскодировании» первых  $k$  разрядов; в противном же случае — вычитаем это число.

Приведём несколько примеров. Записи «742» будет соответствовать число  $700 + 40 + 2$ , в то время как записи «342» — число  $300 - (40 + 2) = 258$  (так как  $3 < 4$ ). Записи «6342» соответствует число  $6300 - 42 = 6258$ , а записи «2342» — число  $2000 - (300 - (40 + 2)) = 1742$  (здесь сразу  $2 < 3$  и  $3 < 4$ ). Записи «55» соответствует число 55.

Чтобы не запутаться, будем обозначать через  $S_{\text{Д}}$  число, соответствующее строке  $S$ , если воспринимать её как запись в традиционной десятичной системе счисления, а через  $S_{\text{Р}}$  — число, соответствующее строке  $S$ , если воспринимать её как запись в «римской» десятичной системе счисления. Иными словами,

$$2342_{\text{Р}} = 1742_{\text{Д}} = \text{одна тысяча семьсот сорок два} \in \mathbb{N}.$$

1. Какие числа соответствуют следующим записям:  $333_{\text{Р}}$ ,  $2050_{\text{Р}}$ ,  $10001_{\text{Р}}$ ,  $404004_{\text{Р}}$ ?
2. Перевести десятичные числа в десятичную римскую систему счисления (знак «минус» в десятичной римской системе счисления не используется!):  $91_{\text{Д}}$ ,  $150_{\text{Д}}$ ,  $-1_{\text{Д}}$ ,  $13_{\text{Д}}$ .
3. Опишите все  $S$  такие, что  $S_{\text{Д}} = S_{\text{Р}}$ .
4. Предложите алгоритм построения по **двузначному** положительно-му десятичному числу (то есть, имеющему вид  $ху_{\text{Д}}$ ) его десятичной римской записи.
5. Пусть  $X_{\text{Д}} = Y_{\text{Р}} = N$ . Какая десятичная римская запись будет соответствовать числу  $10 \cdot N$ ? Числу  $-N$ ?
6. Приведите пример числа  $N$  такого, что есть две **различных** строки  $S$ ,  $T$ , для которых выполнено условие

$$S_{\text{Р}} = T_{\text{Р}} = N.$$

7. Может ли у одного числа быть строго больше двух различных десятичных римских записей?
8. Придумайте признаки делимости на 2, на 5, на 3 в десятичной римской системе счисления.
9. Пусть  $Y_{\text{Р}} = N > 0$ . Докажите, что тогда

$$\frac{Y_{\text{Д}}}{3} < N \leq Y_{\text{Д}}.$$

10. **А был ли мальчик?** Можно ли вообще считать «десятичную римскую систему» системой счисления? Покажите, что, строго говоря, нет: приведите пример числа  $M \in \mathbb{N}$ , которому не соответствует ни одной десятичной римской записи.

## Задача 2. Изображения на плоскости

«Алгоритм Тарского, да? :)»

В данной задаче нас будет интересовать возможность представить множество точек на плоскости как множество решений какого-либо уравнения или неравенства. Например, уравнение  $x - y = 0$  задаёт прямую с углом наклона  $45^\circ$ , а неравенство  $\min(x, y) \geq 0$  — первую координатную четверть.

При составлении неравенств и уравнений вам разрешено пользоваться арифметическими действиями — сложением, умножением, вычитанием, делением; функцией модуля —  $|\dots|$ , а также  $\max$  и  $\min$  — взятием наибольшего и наименьшего значений из конечного набора чисел.

1. Докажите, что

(а)  $A \cdot B > 0$  тогда и только тогда, когда числа  $A$  и  $B$  одного знака;

(б)  $\min(x, y) = \frac{1}{2}(x + y - |x - y|)$ ;

(в) Даны числа  $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ . Докажите, что если  $a_k < x < a_{k+1}$ , то знак выражения

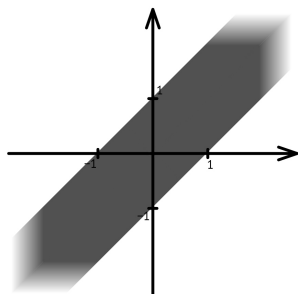
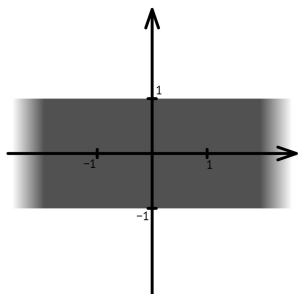
$$(x - a_1) \cdot (x - a_2) \cdot \dots \cdot (x - a_n)$$

совпадает со знаком выражения  $(-1)^n \cdot (-1)^k$ .

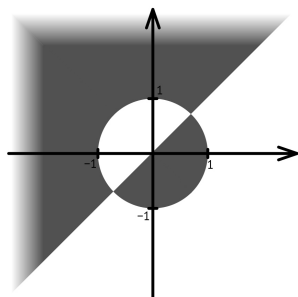
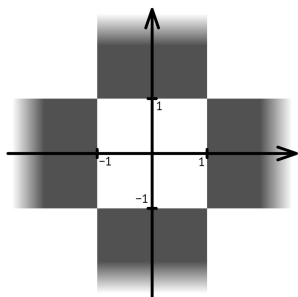
2. Изобразите множество точек  $(x, y)$  на плоскости, удовлетворяющих неравенству

$$\max(|x|, |y|) \geq 1.$$

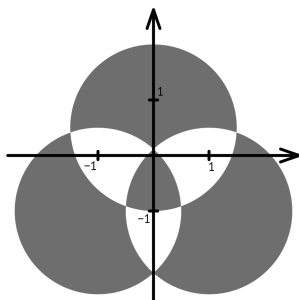
3. Множеством решений какого неравенства является (а) горизонтальная полоса на плоскости (б) наклонная полоса на плоскости (см. рисунок)?



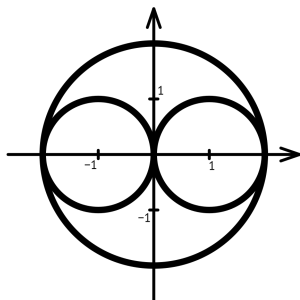
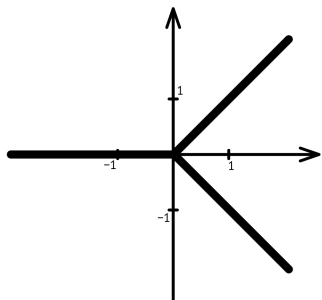
4. Множеством решений какого неравенства является (а) «крестик» на плоскости (б) фигура, полученная из круга и полуплоскости (см. рисунок)?



5. Множеством решений какого неравенства является фигура (см. рисунок), полученная из трёх кругов радиуса 1.5 с центрами в точках  $(1, -1)$ ,  $(-1, -1)$ ,  $(0, 0.5)$ ?



6. Множеством решений какого уравнения является (а) фигура из трёх окружностей (б) фигура из трёх лучей (см. рисунок)?



7. Пусть фигура  $F_1$  — множество решений уравнения  $P_1(x, y) = 0$ , а  $F_2$  — множество решений уравнения  $P_2(x, y) = 0$ . Приведите уравнение, решения которого образуют (а) пересечение фигур  $F_1$  и  $F_2$  (б) объединение фигур  $F_1$  и  $F_2$ ?
8. Пусть фигура  $F_1$  — множество решений неравенства  $P_1(x, y) < 0$ , а  $F_2$  — множество решений неравенства  $P_2(x, y) < 0$ . Приведите неравенства, решения которого образуют (а) пересечение фигур  $F_1$  и  $F_2$  (б) объединение фигур  $F_1$  и  $F_2$  (в) множество точек, лежащих либо в фигуре  $F_1$ , либо в фигуре  $F_2$ , но не в них обеих одновременно?

### Задача 3. Простеющие числа

Рассмотрим число 12. Среди чисел, меньших, чем 12, взаимно простые с ним следующие:

1, 5, 7, 11.

Все они, кроме единицы, являются простыми. А вот среди чисел, меньших 10 и взаимно простых с 10, есть, например, 9 — составное число.

Итак, число называется *простеющим*, если все числа, меньшие его и взаимно простые с ним — 1 или простые. Как мы выяснили, 12 — простеющее число, а 10 — нет.

1. Приведите примеры других простеющих чисел, кроме 12.

---

2. Перечислите все нечётные простеющие числа.
3. Перечислите все простеющие числа, не делящиеся на 3.
4. Перечислите все простеющие числа, не делящиеся на 5.

---

5. Докажите, что число вида  $p^2 + 1$ , где  $p$  — простое, не может быть простеющим.
  6. Докажите, что если  $n > p_1 \cdot p_2$ ,  $p_1$  и  $p_2$  — простые числа, и  $n$  не делится ни на  $p_1$ , ни на  $p_2$ , то оно не может быть простеющим.
  7. Докажите, что всякое простеющее число имеет вид  $p + 1$ , где  $p$  — какое-то простое.
- 
8. Бесконечно ли множество простеющих чисел?

## Задачи профильного варианта 8 класса

### Задача 1. Простеющие числа

Рассмотрим число 12. Среди чисел, меньших, чем 12, взаимно просты с ним следующие:

1, 5, 7, 11.

Все они, кроме единицы, являются простыми. А вот среди чисел, меньших 10 и взаимно простых с 10, есть, например, 9 — составное число.

Итак, число называется *простеющим*, если все числа, меньшие его и взаимно простые с ним — 1 или простые. Как мы выяснили, 12 — простеющее число, а 10 — нет.

1. Приведите примеры других простеющих чисел, кроме 12.

- 
2. Перечислите все нечётные простеющие числа.
  3. Перечислите все простеющие числа, не делящиеся на 3.
  4. Перечислите все простеющие числа, не делящиеся на 5.

- 
5. Докажите, что число вида  $p^2 + 1$ , где  $p$  — простое, не может быть простеющим.

6. Докажите, что если  $n > p_1 \cdot p_2$ ,  $p_1$  и  $p_2$  — простые числа, и  $n$  не делится ни на  $p_1$ , ни на  $p_2$ , то оно не может быть простеюшим.

7. Докажите, что всякое простеющее число имеет вид  $p + 1$ , где  $p$  — какое-то простое.

8. Бесконечно ли множество простеющих чисел?

## Задача 2. Расстояние между множествами

*«Знаете, как на русский язык переводится фамилия „Хаусдорф“?  
Домик в деревне!»*

В данной задаче мы рассматриваем **только** конечные множества точек на плоскости, которые всегда будем обозначать буквами  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Плоскость замечательна тем, что на ней определено расстояние между точками  $\text{dist}(x, y)$  — его можно мыслить, как длину кратчайшего отрезка, соединяющего  $x$  и  $y$ . Напомним три основных свойства расстояния между точками:

- $\text{dist}(x, y) = \text{dist}(y, x)$ ;
- $\text{dist}(x, y) = 0$  тогда и только тогда, когда  $x = y$ ;
- Для всех  $x, y, z$  выполнено «неравенство треугольника»:

$$\text{dist}(x, y) + \text{dist}(y, z) \geq \text{dist}(x, z).$$

Также нам понадобится понятие *наименьшего значения*: если  $f(x)$  — выражение, куда можно подставлять разные значения переменной  $x$ , то  $\min_x f(x)$  — это наименьшее число, которое может получиться при подстановке чего-либо в выражение  $f$ . Например,  $\min_x x^2 = 0$ . Похожим образом обозначается наибольшее значение —  $\max_x f(x)$ .

1. Рассмотрим квадрат  $A_1A_2B_1B_2$  со стороной 1. Пусть  $M_1 = \{A_1, A_2\}$ ,  $M_2 = \{B_1, B_2\}$ . Чему равно число

$$\max_{x \in M_1} \left( \min_{y \in M_2} \text{dist}(x, y) \right)?$$

А чему равно

$$\min_{y \in M_2} \left( \max_{x \in M_1} \text{dist}(x, y) \right)?$$

Например, для подсчёта первого выражения вам нужно для каждой из точек  $A_1, A_2$  найти расстояние до ближайшей к ней точки из множества  $M_2$ , а затем взять наибольшее из этих двух расстояний.

2. Как оказалось,  $M_1$  и  $M_2$  из предыдущего пункта — пример таких множеств, что указанные нами величины для них не совпадают. Докажите, тем не менее, что для любых двух  $A, B$  выполнено неравенство:

$$\max_{x \in A} \left( \min_{y \in B} \text{dist}(x, y) \right) \leq \min_{y \in B} \left( \max_{x \in A} \text{dist}(x, y) \right).$$

3. Докажите, что по заранее заданному положительному числу  $r$  всегда можно подобрать два множества  $A, B$  так, что разность двух величин из предыдущего пункта будет равна  $r$ . Иными словами, эту разность можно сделать сколь угодно большой.

Также нам потребуется понятие *окрестности множества*. Пусть  $A$  — конечное и состоит из точек на плоскости. Тогда его  $\rho$ -окрестность — это фигура, являющаяся объединением кругов радиуса  $\rho$  с центрами в точках множества  $A$ . Для иллюстрации этого понятия предлагаем вам изобразить 1-окрестность множества из двух точек, расстояние между которыми равно 2.

4. Приведите пример  $A, B$  таких, что  $A$  целиком лежит в 1-окрестности  $B$ , но  $B$  не лежит в 1-окрестности  $A$ .
5. Пусть  $A, B$  и  $C$  — три конечных множества точек на плоскости. Докажите, что если  $B$  целиком лежит в  $\rho_1$ -окрестности  $A$ , а  $C$  целиком лежит в  $\rho_2$ -окрестности  $B$ , то  $C$  целиком лежит в  $(\rho_1 + \rho_2)$ -окрестности  $A$ .
6. Докажите, что для любого  $A$  выполнено

$$\max_{x \in A} \left( \min_{y \in A} \text{dist}(x, y) \right) = 0.$$

7. Докажите, что если  $\max_{x \in A} \left( \min_{y \in B} \text{dist}(x, y) \right) \leq R$ , то множество  $A$  целиком лежит в  $R$ -окрестности множества  $B$ . Докажите обратный факт.
8. Пользуясь предыдущими пунктами, проверьте, что для следующего выражения (вместо  $A$  и  $B$  можно подставлять конечные множества точек на плоскости) выполнены три свойства расстояния, перечисленные в начале этой задачи:

$$\text{DIST}(A, B) = \max \left\{ \max_{x \in A} \left( \min_{y \in B} \text{dist}(x, y) \right), \max_{x \in B} \left( \min_{y \in A} \text{dist}(x, y) \right) \right\}.$$

В частности, первое свойство следует из того, что выражение никак не меняется при замене  $A$  на  $B$  и наоборот.



Поздравляем вас! Только что вы определили **расстояние Хаусдорфа**  $\text{DIST}(A, B)$  между множествами на плоскости. Это незаменимый объект в математике. Предлагаем вам доказать простейший, но очень важный факт про это расстояние:

9. Если  $A$  и  $B$  являются подмножествами одного и того же круга радиуса  $R$ , то  $\text{DIST}(A, B) \leq R$ .

### Задача 3. Изображения на плоскости

«Алгоритм Тарского, да? :)»

В данной задаче нас будет интересовать возможность представить множество точек на плоскости как множество решений какого-либо уравнения или неравенства. Например, уравнение  $x - y = 0$  задаёт прямую с углом наклона  $45^\circ$ , а неравенство  $\min(x, y) \geq 0$  — первую координатную четверть.

При составлении неравенств и уравнений вам разрешено пользоваться арифметическими действиями — сложением, умножением, вычитанием, делением; функцией модуля —  $|\dots|$ , а также  $\max$  и  $\min$  — взятием наибольшего и наименьшего значений из конечного набора чисел.

1. Докажите, что

(а)  $A \cdot B > 0$  тогда и только тогда, когда числа  $A$  и  $B$  одного знака;

(б)  $\min(x, y) = \frac{1}{2}(x + y - |x - y|)$ ;

(в) Даны числа  $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ . Докажите, что если  $a_k < x < a_{k+1}$ , то знак выражения

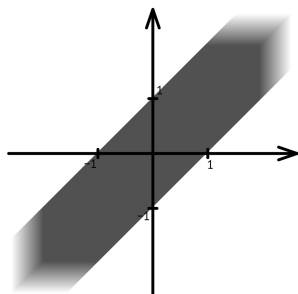
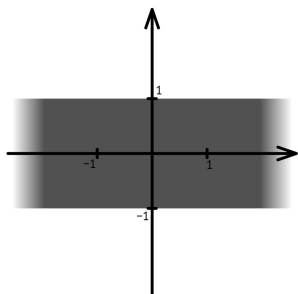
$$(x - a_1) \cdot (x - a_2) \cdot \dots \cdot (x - a_n)$$

совпадает со знаком выражения  $(-1)^n \cdot (-1)^k$ .

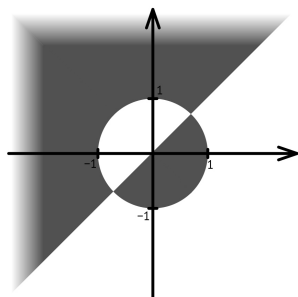
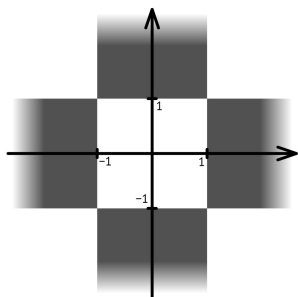
2. Изобразите множество точек  $(x, y)$  на плоскости, удовлетворяющих неравенству

$$\max(|x|, |y|) \geq 1.$$

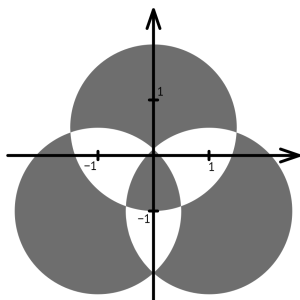
3. Множеством решений какого неравенства является (а) горизонтальная полоса на плоскости (б) наклонная полоса на плоскости (см. рисунок)?



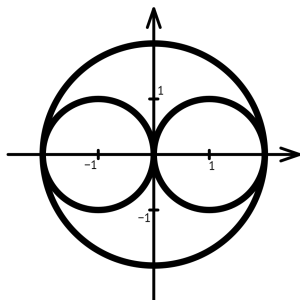
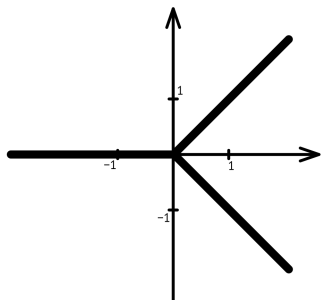
4. Множеством решений какого неравенства является (а) «крестик» на плоскости (б) фигура, полученная из круга и полуплоскости (см. рисунок)?



5. Множеством решений какого неравенства является фигура (см. рисунок), полученная из трёх кругов радиуса 1.5 с центрами в точках  $(1, -1)$ ,  $(-1, -1)$ ,  $(0, 0.5)$ ?



6. Множеством решений какого уравнения является (а) фигура из трёх окружностей (б) фигура из трёх лучей (см. рисунок)?



7. Пусть фигура  $F_1$  — множество решений уравнения  $P_1(x, y) = 0$ , а  $F_2$  — множество решений уравнения  $P_2(x, y) = 0$ . Приведите уравнение, решения которого образуют (а) пересечение фигур  $F_1$  и  $F_2$  (б) объединение фигур  $F_1$  и  $F_2$ ?
8. Пусть фигура  $F_1$  — множество решений неравенства  $P_1(x, y) < 0$ , а  $F_2$  — множество решений неравенства  $P_2(x, y) < 0$ . Приведите неравенства, решения которого образуют (а) пересечение фигур  $F_1$  и  $F_2$  (б) объединение фигур  $F_1$  и  $F_2$  (в) множество точек, лежащих либо в фигуре  $F_1$ , либо в фигуре  $F_2$ , но не в них обеих одновременно?

# Условия задач 2017 года

## Задачи 4 класса

### Задача 1. Обаятельный домовёнок

- А. Про домовёнка Кузю издано 40 статей. Кузя решил заняться их чтением с целью узнать о себе что-нибудь новое. Каждый день Кузя читает по 6 статей, но при этом издаётся 4 новых. Как скоро Кузя догонит издателей?
- В. Кузя напечатал 10 000 квадратиков со стороной 1 см, после этого у него закончились чернила. Сколько квадратиков со стороной 2 см он сможет напечатать?
- С. Дана таблица  $7 \times 7$ . В центры её клеток Кузя вбил гвоздики. Проведите линию через все гвоздики так, чтобы сделать при этом как можно меньшее количество поворотов.

### Задача 2. Велопоход

- А. Девочка въезжает в горку длиной 400 метров со скоростью 10 километров в час. Как долго она будет это делать?
- В. Начинаящая Полина едет на велосипеде без остановок со скоростью 15 км/ч, а опытный Дмитрий Григорьевич — со скоростью 34 км/ч, но остановки на отдых отнимают у него столько же времени, сколько он находится в движении. Кто же в итоге быстрее?
- С. Подъём в горку и спуск с неё имеют одинаковую длину. Степан на гоночном велосипеде въезжает в горку со скоростью 10 км/ч, а спускается со скоростью 40 км/ч. А Пётр на тракторе едет с постоянной скоростью 17 км/ч. Кто из них быстрее преодолеет подъём и спуск?

### Задача 3. Буквы на белом листе

- А. Какие буквы русского алфавита можно перерисовать в другие, добавляя линии?
- В. Какая буква русского алфавита, если написать её на листе бумаги, поделит его на наибольшее число областей?
- С. Вдохновившись предыдущими пунктами этой задачи, мальчик Гера Симонов написал на листе бумаги две буквы О. На сколько областей они могли поделить лист?

### Задача 4. Делить и резать, резать и делить

- А. Как двумя линиями разделить прямоугольник на четыре части одинаковой площади, имея только карандаш и линейку без разметки?
- В. Изобразите фигуру, которую можно одним прямым разрезом поделить на три части одинаковой площади.
- С. Каждый из двух разрезов делит фигуру на две части одинаковой площади. Обязательно ли вместе они делят фигуру на четыре части одинаковой площади?

### Задача 5. О, как мы далеки!

- А. На прямой дороге расположены четыре остановки:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  (не обязательно в таком порядке). Известно, что расстояние между остановками  $A$  и  $D$  равно 1 км, между  $B$  и  $C$  — 2 км, между  $B$  и  $D$  — 3 км, между  $A$  и  $B$  — 4 км, а между  $C$  и  $D$  — 5 км. Чему равно расстояние между остановками  $A$  и  $C$ .
- В. Вдоль прямой аллеи растут четыре дерева. Расстояния между соседними равны 63, 14 и 84 метра соответственно. Сколько деревьев надо ещё посадить, чтобы расстояние между любыми двумя соседними деревьями было одинаковым?
- С. Можно ли на прямой отметить точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$  так, чтобы расстояния между ними оказались равны:  $AB = 6$ ,  $BC = 7$ ,  $CD = 10$ ,  $DE = 9$ ,  $AE = 12$ ? Если можно, то покажите как, если нет — объясните, почему.

## Задача 6. Быть врачом — весьма ответственно!

- А.** Доктор оперирует Геометричного дождевого червя. Особенность червя в том, что, отдыхая, он выворачивается линией из шести отрезков, которая пересекает каждый свой отрезок ровно один раз. При этом он ещё и кусает себя за хвост. Как выглядит отдыхающий Геометричный червь?
- В.** Другой доктор учится закреплять сломанные кости. На экзамене ему выдали шесть абсолютно прямых костей одинаковой длины. Он должен завязать на этих костях 12 узлов хирургической нитью, причём на каждой кости должно быть по 4 узелка. Каждый узел связывает не более двух костей. Помогите врачу справиться с этим заданием.
- С.** Ещё три доктора — Айболит, Пеппер и Ватсон — по очереди оперируют заразного больного, при этом у них всего две пары перчаток. Перчатки можно надевать наизнанку и друг на друга. По медицинским правилам руки разных хирургов не должны касаться одной поверхности перчаток. Оперировать одной рукой нельзя. Могут ли хирурги обойтись данными им перчатками?

## Задачи 5 класса

### Задача 1. Поделим – посмотрим

- А.** На какое наибольшее число областей делят плоскость 4 прямоугольных треугольника?
- В.** На какое наибольшее число областей может разбить прямая семиугольник? Докажите, что на большее число никакой семиугольник разбить нельзя.
- С.** На какое наибольшее число областей делят плоскость 15 одинаковых по размеру квадратов, все стороны которых горизонтальны либо вертикальны?

### Задача 2. Шутка

- А.** Дана 200-этажная башня. Стул с 30 ножками скидывают с её крыши, и одновременно с этим более лёгкий стул совсем без ножек отправ-

ляют катиться вниз по лестнице внутри башни. Может ли безногий стул достигнуть земли быстрее, чем летящий?

- В.** Выписка из дневника автора условий олимпиады «Математика НОН-СТОП»:

*Так, вчера я придумал всего четыре задачи... Мне снилось, что сегодня я придумаю в полтора раза больше задач, чем в сумме за день, когда сегодня останется вчера, и за день, для которого сегодня должно было наступить завтра... Однако в день, который будет вчера для завтра и был завтра для вчера, я придумал в три раза больше задач, чем за послезавтрашнее вчера... Что за сны-то такие странные в последнее время?..*

Если верить сну, сколько задач должен был придумать автор в день, когда он оставил эту заметку?

- С.** Автомобиль выехал из Петербурга в Пекин и сломался через 80 километров. На исправление неполадок ушло, правда, всего две минуты. Однако, проехав ещё 40 километров, автомобиль вновь сломался, но вновь был отремонтирован за две минуты. Далее перед каждой следующей поломкой автомобиль проезжал вдвое меньше, чем перед предыдущей, но приводился в рабочее состояние за неизменные две минуты. Доедет ли он в итоге до Пекина?

### **Задача 3. О, как мы далеки!**

- А.** На прямой дороге расположены четыре остановки:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  (не обязательно в таком порядке). Известно, что расстояние между остановками  $A$  и  $D$  равно 1 км, между  $B$  и  $C$  — 2 км, между  $B$  и  $D$  — 3 км, между  $A$  и  $B$  — 4 км, а между  $C$  и  $D$  — 5 км. Чему равно расстояние между остановками  $A$  и  $C$ .
- В.** Вдоль прямой аллеи растут четыре дерева. Расстояния между соседними равны 63, 14 и 84 метра соответственно. Сколько деревьев надо ещё посадить, чтобы расстояние между любыми двумя соседними деревьями было одинаковым?
- С.** Можно ли на прямой отметить точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$  так, чтобы расстояния между ними оказались равны:  $AB = 6$ ,  $BC = 7$ ,  $CD = 10$ ,  $DE = 9$ ,  $AE = 12$ ? Если можно, то покажите как, если нет — объясните, почему.

## Задача 4. Простые, но такие сложные

- А. Натуральное число называется простым, если оно нацело делится только на себя и на единицу. Найдите все такие простые числа  $p$ , что числа  $p + 2$  и  $p + 4$  тоже простые.
- В. Натуральное число  $n$  является произведением двух простых чисел. Каждое из этих простых чисел увеличили на 1. Произведение полученных чисел оказалось на 100 больше, чем  $n$ . Чему равно число  $n$ ? Найдите все возможные варианты и объясните, почему других нет.
- С. В ряд стоят 50 выключателей. Мимо них проходят 50 электриков —  $k$ -ый из них переключает каждый  $k$ -ый выключатель (включает, если он был выключен, и наоборот). Например, седьмой электрик переключит фонари под номерами 7, 14, 21, 28 и так далее. Какие фонари останутся включенными после прохода электриков?

## Задача 5. Неизвестные цифры

- А. Имеет ли данный ребус решение — то есть, можно ли сопоставить разным буквам разные цифры так, чтобы равенство стало верным:  
$$\text{М} \cdot \text{И} \cdot \text{З} \cdot \text{А} \cdot \text{Н} \cdot \text{Т} \cdot \text{Р} \cdot \text{О} \cdot \text{П} = \text{ХРОМОТА} ?$$
- В. Решите ребус:  $\text{КРЕМ} + \text{КРЕМ} = \text{ЖЕЛЕ}$ , если известно, что  $\text{Л} = 9$ .
- С. Учитель написал на доске 10 последовательных чисел. Шаловливый Стёпа, уходя после уроков домой, стёр одно — и тут же забыл, какое. Он помнил только, что сумма оставшихся на доске чисел равна 2017. Какое же конкретно число он стёр?

## Задача 6. И пусть Бетховен услышит

Девочка Лина играет на круговом фортепиано аналог «Лунной сонаты» собственного сочинения. На таком фортепиано клавиши расположены в виде кольца, а исполнитель должен предварительно залезть внутрь этой конструкции. Таким образом, если идти слева направо, после всех 88 клавиш ноты начинаются с начала.

- А. Первую часть сонаты Лина начинает с клавиши под номером один. Сначала она прыгает на один шаг вправо. Затем на две клавиши влево. Потом на три клавиши вправо, четыре клавиши влево, и так далее. На каком шаге Лина первый раз нажмёт на клавишу под номером 45?

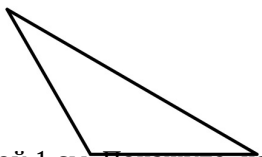


- В.** Вторую часть сонаты Лина подпеваает: ЛЯ, ЛЮ-ЛЯ, ЛЮ-ЛЮ-ЛЮ-ЛЯ, ЛЮ-ЛЮ-ЛЮ-ЛЮ-ЛЮ-ЛЮ-ЛЮ-ЛЮ-ЛЯ,... (перед каждой буквой Л добавляется ЛЮ). На каждое ЛЮ или ЛЯ она, начиная с первой клавиши, идёт слева направо и нажимает по одной клавише на фортепиано. Когда первый раз "ЛЯ" Лины будет пропето одновременно с нажатием клавиши под номером 48?
- С.** Третью часть сонаты Лина играет, нажимая сначала на первую клавишу, потом прыгает на одну клавишу вправо, потом ещё на две клавиши, ещё на три, ..., ещё на 100. После этого она повторяет такую мелодию ещё 1935 раз. На какую по счёту клавишу она нажмёт последней?

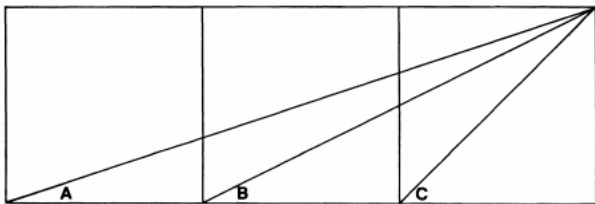
## Задачи 6 класса

### Задача 1. Разрезания и углы

- А.** Разрежьте тупоугольный треугольник ниже на семь остроугольных треугольников. Прямоугольный треугольник не считается остроугольным.



- В.** Дан квадрат со стороной 1 см. Покажите, как разрезать его на остроугольные треугольники.
- С.** Докажите, что сумма величин углов  $A$  и  $B$  на рисунке равна величине угла  $C$



### Задача 2. Пока не пришёл лифёр

Витя и Петя живут в бесконечном вверх и вниз доме и очень любят кататься на лифте. Как-то раз неведомые хулиганы сломали кнопки во всех лифтах так, что те могли двигаться только на  $n$  этажей вверх или вниз и на  $m$  этажей вверх или вниз.

- А.** Мальчики не растерялись — сели каждый в свой лифт и одновременно выехали с нулевого этажа, причём Витя с каждым раз едет на  $n$  этажей вверх, а Петя — на  $m$  этажей вверх. Оказалось, что первый раз они побывали на одном и том же этаже под номером 123. Чему могли быть равны  $n, m$ ?
- В.** Петя находится этажом выше Вити. Петин лифт умеет ездить на  $k$  этажей вверх или вниз, Витин — на  $k + 1$  этаж вверх или вниз. Мальчики начинают ездить на лифтах, как им заблагорассудится. Может ли Петя управлять своим лифтом так, чтобы никогда не встретиться с Витей на одном этаже? Обязательно ли для этого Пете знать этаж, на котором в данный момент находится Витя?
- С.** Теперь Витя решил с помощью двух кнопок — на  $n$  этажей вверх или на  $m$  вниз — добраться на лифте с нулевого этажа до первого. И у него получилось. Докажите, что  $\text{НОД}(n, m) = 1$ .

### Задача 3. На плоскости

- А.** Квадрат разрезан на 36 квадратиков. Из них 35 имеют площади, равные 1, а один имеет площадь большую 1. Какую?
- В.** Дано 12 прочных секций забора одинаковой длины. Какое наибольшее число изолированных областей можно отгородить ими от бесконечного плоского пастбища?
- С.** Докажите, что любой четырёхугольник имеет хотя бы одну высоту, выходящую из какой-нибудь вершины, попадающую на одну из его сторон, а не на продолжение.

### Задача 4. Неземное стихосложение

- А.** Известный венерианский поэт несколько лет назад написал знаменитое незамысловатое стихотворение, начальные строчки которого мы приводим:

Продолжите его, напишите последующие три строчки.

- В.** Венерианскому поэту на День рождения подарили большой круглый торт, и он прямым разрезом поделил его пополам. Придумайте форму блюда такую, что на одно блюде этой формы нельзя положить полторта, но на два одинаковых блюда такой формы можно положить целый торт.
- С.** В Венерианском литературном обществе состоит 2017 поэтов. Докажите, что среди них найдутся трое, знакомые каждый друг с другом, или трое, не знакомые друг с другом.

## Задача 5. Простые, но такие сложные

- А.** Натуральное число называется простым, если оно нацело делится только на себя и на единицу. Найдите все такие простые числа  $p$ , что числа  $p + 2$  и  $p + 4$  тоже простые.
- В.** Натуральное число  $n$  является произведением двух простых чисел. Каждое из этих простых чисел увеличили на 1. Произведение полученных чисел оказалось на 100 больше, чем  $n$ . Чему равно число  $n$ ? Найдите все возможные варианты и объясните, почему других нет.
- С.** В ряд стоят 50 выключателей. Мимо них проходят 50 электриков —  $k$ -ый из них переключает каждый  $k$ -ый выключатель (включает, если он был выключен, и наоборот). Например, седьмой электрик переключит фонари под номерами 7, 14, 21, 28 и так далее. Какие фонари останутся включенными после прохода электриков?

## Задача 6. Шутка

- А.** Дана 200-этажная башня. Стул с 30 ножками скидывают с её крыши, и одновременно с этим более лёгкий стул совсем без ножек отправляют катиться вниз по лестнице внутри башни. Может ли безногий стул достигнуть земли быстрее, чем летящий?
- В.** Выписка из дневника автора условий олимпиады «Математика НОН-СТОП»:

*Так, вчера я придумал всего четыре задачи... Мне снилось, что сегодня я придумаю в полтора раза больше задач, чем в сумме за день, когда сегодня останется вчера, и за день, для*

*которого сегодня должно было наступить завтра... Однако в день, который будет вчера для завтра и был завтра для вчера, я придумал в три раза больше задач, чем за послезавтрашнее вчера... Что за сны-то такие странные в последнее время?..*

Если верить сну, сколько задач должен был придумать автор в день, когда он оставил эту заметку?

- С. Автомобиль выехал из Петербурга в Пекин и сломался через 80 километров. На исправление неполадок ушло, правда, всего две минуты. Однако, проехав ещё 40 километров, автомобиль вновь сломался, но вновь был отремонтирован за две минуты. Далее перед каждой следующей поломкой автомобиль проезжал вдвое меньше, чем перед предыдущей, но приводился в рабочее состояние за неизменные две минуты. Доедет ли он в итоге до Пекина?

## Задача 7. Многонациональные захватчики

- А. Армии девяти государств вторглись на остров, имеющий форму таблицы  $5 \times 5$ . Каждая из армий хочет захватить себе по ячейке на этом острове так, чтобы любая из незахваченных ячеек имела бы общую сторону ровно с одной захваченной. Помогите им это сделать.
- В. Армии ста государств вторглись на остров, имеющий форму таблицы  $100 \times 100$ . Они хотят поделить его между собой так, чтобы клетки в каждой строке и в каждом столбце все принадлежали разным государствам. Потом каждое государство захватило себе по одной клетке. Всегда ли можно поделить между государствами остальные клетки так, чтобы не нарушить поставленное условие?
- С. Армия одного государства вторглась на остров, заселённый аборигенами. Известно, что остров имеет форму таблицы  $(2k+1) \times (2k+1)$ . Может ли эта армия захватить некоторые клетки острова таким образом, чтобы каждая клетка имела ровно две захваченных, соседних с ней по стороне?

## Задача 8. Все числа состоят из цифр

- А. Существует ли такое двузначное число, что если поменять в нём цифры местами, оно станет в три раза больше?

- В.** Илья и Алексей разгадывают числовой шифр  $XYZ$  из трёх цифр. Им известно, что искомое число делится на 9 и не делится на 10. Кроме того, первые две цифры образуют двузначное число  $XY$ , которое является квадратом некоторого натурального числа, а две последние цифры образуют двузначное число  $YZ$ , которое меньше 40. Помогите ребятам разгадать шифр.
- С.** Натуральное число  $n$  имеет 61 разряд и состоит из двоек, троек и четверок. При этом двоек на 19 больше, чем четверок. Найти остаток от деления числа  $n$  на 9.

## Задачи 7 класса

### Задача 1. Переводчики с немецкого

- А.** Переводчику нужно перевести несколько рекламных брошюр и несколько газетных заметок. Он подсчитал, что если увеличить в некоторое целое число раз количество имеющихся у него брошюр, то их станет 116. А если увеличить в такое же число раз количество имеющихся газетных заметок, то их станет 217. Сколько же брошюр и сколько заметок предстоит перевести?
- В.** Перед коллективом из трёх переводчиков стоит задача перевести 16 журналистских обзоров, 16 художественных текстов и 16 технических. Каждый из них сказал, сколько текстов какой специфики хочет перевести, причём пожелание каждого включало 16 текстов. Более того, в сумме переводчики хотят перевести ровно 16 журналистских, 16 художественных и 16 технических текстов. Докажите, что их начальник может распределить тексты для перевода так, чтобы удовлетворить пожеланиям каждого из переводчиков.
- С.** Переводчик работает с текстом на 2-немецком. Текст на 2-немецком характерен тем, что значение может быть заключено не только в словах, но и в сочетаниях из двух подряд идущих слов. При этом всякое отдельное слово и всякое сочетание имеют своё значение. Сколькими способами можно разбить текст из  $n$  слов на слова и сочетания?

## Задача 2. Гонки улиток

- А.** Две улитки ползут снизу вверх по столбу высотой 7 метров. Первая за день проползает 5 метров, но за ночь скатывается на 4 метра. Вторая за день преодолевает 3 метра, а за ночь соскальзывает лишь на 1. Какая из улиток быстрее доберётся до верха столба?
- В.** Дан клетчатый лист  $31 \times 31$ . В центре каждой клетки сидит по улитке. В полночь каждая улитка пере- ползает на одну из четырёх клеток, соседних с её родной. Докажите, что в какой-то из клеток теперь нет ни одной улитки.
- С.** Высоко-высоко на стене сидит улитка. Прямо под ней, у подножия стены — ещё одна. Верхняя улитка хочет встретиться с нижней, а нижняя — избежать встречи с верхней. Про каждую улитку известна её максимальная скорость. Докажите, что у более быстрой улитки из этих двоих всегда есть возможность осуществить своё собственное желание.

## Задача 3. Участники «Математики НОН-СТОП»

- А.** Парты в одном из кабинетов, где проходит олимпиада, стоят в три колонки по шесть парт в каждой. За 20 минут до олимпиады в кабинете сидело 8 школьников. Докажите, что из кабинета пока что можно утащить две свободные парты, стоящие друг за другом. А если бы школьников было 9?
- В.** Не оставляет никакого сомнения, что некоторые участники нашей олимпиады (в прошлом году, например, их было более 400) знакомы друг с другом. Докажите, что найдутся два участника, имеющие одинаковое количество знакомых среди других участников олимпиады.
- С.** Докажите, что среди участников олимпиады «Математика НОН-СТОП» найдутся трое, знакомые каждый друг с другом, или трое, не знакомые друг с другом.

## Задача 4. Загадывание чисел

- А.** Ваня и Даня загадали по числу. Сложив эти два числа, мальчики выяснили, что их сумма делится на одно из них. Чему равен наибольший общий делитель чисел, загаданных мальчиками?

- В.** Галя и Валя загадали по числу. Оказалось, что загаданные девочками числа взаимно просты. Могут ли остатки от деления этих чисел на 17 оказаться не взаимно простыми? С другой стороны, верно ли, что если остатки  $a$  и  $b$  от деления на любое число взаимно просты, то и  $a$  взаимно просто с  $b$ ?
- С.** Болек загадывает число. Лёлек просит его прибавить к загаданному числу сначала 3, потом 4, потом 5, потом 6, и наконец перемножить полученные четыре результата. У Болека получилось 288. Помогите Лёлеку найти загаданное число!

## **Задача 5. Многонациональные захватчики**

- А.** Армии девяти государств вторглись на остров, имеющий форму таблицы  $5 \times 5$ . Каждая из армий хочет захватить себе по ячейке на этом острове так, чтобы любая из незахваченных ячеек имела бы общую сторону ровно с одной захваченной. Помогите им это сделать.
- В.** Армии ста государств вторглись на остров, имеющий форму таблицы  $100 \times 100$ . Они хотят поделить его между собой так, чтобы клетки в каждой строке и в каждом столбце все принадлежали разным государствам. Потом каждое государство захватило себе по одной клетке. Всегда ли можно поделить между государствами остальные клетки так, чтобы не нарушить поставленное условие?
- С.** Армия одного государства вторглась на остров, заселённый аборигенами. Известно, что остров имеет форму таблицы  $(2k+1) \times (2k+1)$ . Может ли эта армия захватить некоторые клетки острова таким образом, чтобы каждая клетка имела ровно две захваченных, соседних с ней по стороне?

## **Задача 6. Порезать торт на День рождения**

- А.** Девочке Глаше на День рождения подарили большой круглый торт. Может ли её непоседливый брат Гоша сделать в нём три непересекающихся прямых разреза так, чтобы нельзя было провести ещё трёх разрезов, которые вместе с исходными образовывали бы замкнутую несамопересекающуюся шестизвенную ломаную?
- В.** Девочке Зине на День рождения тоже подарили большой круглый торт, а она прямым разрезом поделила его пополам. Придумайте

форму блюдца такую, что на одно блюдце этой формы нельзя положить полторта, но на два одинаковых блюдца такой формы можно положить целый торт.

- С. Мальчику Феде на День рождения подарили торт в форме большого куба. Его верх и бока равномерно политы шоколадной глазурью с кокосовой крошкой. Помогите Феде разделить торт так, чтобы ему и четырём его друзьям досталось поровну объёма торта и поровну глазури.

## Задача 7. Взвешивания

- А. Кухонные весы врут — число, которое они показывают, на какое-то фиксированное количество граммов больше, чем реально лежащая на них масса. При взвешивании картофеля получилось 1000 граммов, при взвешивании домашнего кота — 4400 граммов. При взвешивании кота вместе с картофелем — 5000 граммов. Чему же равна погрешность весов?
- В. Даны 729 монет, из них одна фальшивая — немного легче настоящих. Найдите её за 6 взвешиваний на двухчашечных весах без гирь.
- С. Весы на рынке умеют показывать суммарную массу лежащих на них предметов. Есть 15 мешков: в 14 настоящие монеты, каждая весом по 20 граммов, и в последнем фальшивые — весом по 25 граммов. Как за одно взвешивание определить, в каком из мешков лежат фальшивые монеты?

## Задача 8. Шутка

- А. Дана 200-этажная башня. Стул с 30 ножками скидывают с её крыши, и одновременно с этим более лёгкий стул совсем без ножек отправляют катиться вниз по лестнице внутри башни. Может ли безногий стул достигнуть земли быстрее, чем летящий?
- В. Выписка из дневника автора условий олимпиады «Математика НОН-СТОП»:

*Так, вчера я придумал всего четыре задачи... Мне снилось, что сегодня я придумаю в полтора раза больше задач, чем в сумме за день, когда сегодня останется вчера, и за день, для которого сегодня должно было наступить завтра... Однако*



*в день, который будет вчера для завтра и был завтра для вчера, я придумал в три раза больше задач, чем за послезавтрашнее вчера... Что за сны-то такие странные в последнее время?..*

Если верить сну, сколько задач должен был придумать автор в день, когда он оставил эту заметку?

- С. Автомобиль выехал из Петербурга в Пекин и сломался через 80 километров. На исправление неполадок ушло, правда, всего две минуты. Однако, проехав ещё 40 километров, автомобиль вновь сломался, но вновь был отремонтирован за две минуты. Далее перед каждой следующей поломкой автомобиль проезжал вдвое меньше, чем перед предыдущей, но приводился в рабочее состояние за неизменные две минуты. Доедет ли он в итоге до Пекина?

## Задача 9. Вовочка и клетчатая тетрадь

- А. У Вовочки есть клетчатая тетрадь (клетки — одинаковые, квадратные), линейка без делений и карандаш. Площадь каждой клетки в тетради —  $100 \text{ мм}^2$ . Как Вовочке имеющимися средствами построить квадрат площадью  $1000 \text{ мм}^2$ ?
- В. Вовочка нарисовал в тетради отрезок длиной 50 мм. Как Вовочке имеющимися средствами поделить его на 3 равных части, на 7 равных частей?
- С. Площадь каждой клетки в тетради — по-прежнему  $100 \text{ мм}^2$ . Как при помощи линейки без делений и карандаша построить квадрат площадью  $80 \text{ мм}^2$ ?

## Задача 10. Игра

- А. 2017 единиц стоит в ряд, между ними поставлены плюсы. Двое по очереди ставят пары скобок в выражении так, что после каждого хода оно остаётся осмысленным, причём пару скобок нельзя ставить дважды на одни и те же места. Расставив 2016 пар скобок, они считают значение получившегося выражения — если оно чётно, выигрывает второй, иначе первый. Кто победит при правильной игре?
- В. Даны две кучи камней: в одной 23 камня, вторая пока пустая. Также дан мешок с 2017 камнями. Разрешены два типа ходов. Можно

брать 1, 2, 3 или 4 камня и перекладывать их из первой кучи во вторую. Также можно перекладывать 1, 2, 3 или 4 камня (если они там есть) из второй кучи в первую — при этом столько же камней, сколько взято, нужно выкинуть из мешка в окно. Играют двое; проигрывает тот, кто выкидывает последний камень из мешка. Кто победит при правильной игре?

- С. Дана куча, в которой  $n$  камней. Играют двое; за ход можно убирать из кучи 1, 2, 3, ..., 8, 10, 12 или 14 камней. Выигрывает убравший последний камень. Кто победит при правильной игре? Не забудьте, что ответ должен зависеть от  $n$ .

## Задачи 8 класса

### Задача 1. Неизвестные цифры

- А. Имеет ли данный ребус решение — то есть, можно ли сопоставить разным буквам разные цифры так, чтобы равенство стало верным:
- $$\text{М} \cdot \text{И} \cdot \text{З} \cdot \text{А} \cdot \text{Н} \cdot \text{Т} \cdot \text{Р} \cdot \text{О} \cdot \text{П} = \text{ХРОМОТА} ?$$

- В. Решите ребус:  $\text{КРЕМ} + \text{КРЕМ} = \text{ЖЕЛЕ}$ , если известно, что  $\text{Л} = 9$ .

- С. Учитель написал на доске 10 последовательных чисел. Шаловливый Стёпа, уходя после уроков домой, стёр одно — и тут же забыл, какое. Он помнил только, что сумма оставшихся на доске чисел равна 2017. Какое же конкретно число он стёр?

### Задача 2. Искусное владение числами

- А. Расставьте в таблицу  $3 \times 3$  числа от 1 до 9 так, чтобы в каждой строке, в каждом столбце и в каждой из двух главных диагоналей сумма чисел равнялась 15.
- В. Придумайте число такое, что оно делится на 17, его сумма цифр равна 17 и оканчивается оно тоже на 17.
- С. Придумайте (или расскажите, как построить) 95-значное число, в котором нет нулей и которое делится на свою сумму цифр.

### Задача 3. Плавающий зоопарк

- А. *Друзьям посвящается.* Австралийская сколиозная кобра спит, изогнувшись замкнутой шестизвенной ломаной, пересекающей каждое своё звено ровно один раз. Схематично изобразите спящую кобру.
- В. Североамериканский кролик-зануда, сидя на капитанском мостике в ожидании своей подружки, рисует на земле четырёхугольники и шестиугольники. Пересечение шестиугольника и четырёхугольника — понятное дело, какой-то многоугольник. Сколько он может иметь углов?
- С. Сколько углов может иметь пересечение  $n$ -угольника и  $m$ -угольника при произвольных  $m$  и  $n$ ?

### Задача 4. Вовочка и клетчатая тетрадь

- А. У Вовочки есть клетчатая тетрадь (клетки — одинаковые, квадратные), линейка без делений и карандаш. Площадь каждой клетки в тетради —  $100 \text{ мм}^2$ . Как Вовочке имеющимися средствами построить квадрат площадью  $1000 \text{ мм}^2$ ?
- В. Вовочка нарисовал в тетради отрезок длиной 50 мм. Как Вовочке имеющимися средствами поделить его на 3 равных части, на 7 равных частей?
- С. Площадь каждой клетки в тетради — по-прежнему  $100 \text{ мм}^2$ . Как при помощи линейки без делений и карандаша построить квадрат площадью  $80 \text{ мм}^2$ ?

### Задача 5. Загадывание чисел

- А. Ваня и Даня загадали по числу. Сложив эти два числа, мальчики выяснили, что их сумма делится на одно из них. Чему равен наибольший общий делитель чисел, загаданных мальчиками?
- В. Галя и Валя загадали по числу. Оказалось, что загаданные девочками числа взаимно просты. Могут ли остатки от деления этих чисел на 17 оказаться не взаимно простыми? С другой стороны, верно ли, что если остатки  $a$  и  $b$  от деления на любое число взаимно просты, то и  $a$  взаимно просто с  $b$ ?

- С. Болек загадывает число. Лёлек просит его прибавить к загаданному числу сначала 3, потом 4, потом 5, потом 6, и наконец перемножить полученные четыре результата. У Болека получилось 288. Помогите Лёлеку найти загаданное число!

## Задача 6. Пути автобуса неисповедимы

- А. В стране Экляндии несколько городов, некоторые соединены между собой дорогами. Между городами ходят автобусы. Известно, что дорог столько же, сколько городов. 4 марта из каждого города выехало по автобусу, а 5 марта каждый автобус приехал в город, соединённый прямой дорогой с его родным. При каком количестве городов возможно, что 5 марта в каждом городе окажется ровно по одному автобусу?
- В. В стране Двудляндии названия городов начинаются исключительно на буквы П и К. При этом каждая дорога соединяет город на букву П с городом на К. Наконец, городов на П на 16 больше, чем городов на букву К. 4 марта из каждого города выехало по автобусу, а 5 марта каждый автобус приехал в город, соединённый дорогой с его родным. Докажите, что в каком-то из городов теперь более одного автобуса.
- С. На острове Квадрайлэнд четыре города. Перечислите все способы соединить эти города дорогами так, чтобы автобусы из них могли разъехаться и 5 марта оказаться по одному в городе.

## Задача 7. Переводчики с немецкого

- А. Переводчику нужно перевести несколько рекламных брошюр и несколько газетных заметок. Он подсчитал, что если увеличить в некоторое целое число раз количество имеющихся у него брошюр, то их станет 116. А если увеличить в такое же число раз количество имеющихся газетных заметок, то их станет 217. Сколько же брошюр и сколько заметок предстоит перевести?
- В. Перед коллективом из трёх переводчиков стоит задача перевести 16 журналистских обзоров, 16 художественных текстов и 16 технических. Каждый из них сказал, сколько текстов какой специфики хочет перевести, причём пожелание каждого включало 16 текстов.

Более того, в сумме переводчики хотят перевести ровно 16 журналистских, 16 художественных и 16 технических текстов. Докажите, что их начальник может распределить тексты для перевода так, чтобы удовлетворить пожеланиям каждого из переводчиков.

- С. Переводчик работает с текстом на 2-немецком. Текст на 2-немецком характерен тем, что значение может быть заключено не только в словах, но и в сочетаниях из двух подряд идущих слов. При этом всякое отдельное слово и всякое сочетание имеют своё значение. Сколькими способами можно разбить текст из  $n$  слов на слова и сочетания?

## Задача 8. Примечательный учебный день

- А. Во дворе школы появилось странное дерево. Сначала оно казалось обыкновенным ростком, но потом, достигнув высоты два метра, ствол разделился на две ветки. Когда дерево доросло до трёх метров, каждая из веток разделилась на три ветки. Соответственно, по достижении деревом высоты  $m$  метров каждая ветка делилась на  $m$  более мелких веток. Со сколькими ветками дерево достигнет высоты 12 метров?
- В. Тем временем в кабинете биологии учитель Анастасия Спиридоновна осознала: перед ней 26 ужасных детей — 13 неугомонных мальчиков и 13 не менее неугомонных девочек. Она завела себе за партой каждую неделю менять рассадку детей в классе так, чтобы за партой всегда сидели один мальчик и одна девочка, но при этом пара, сидящая за партой, не сидела бы вместе ни в одну из предыдущих недель. На протяжении скольких недель она сможет следовать заведённому себе правилу?
- С. Каким станет ответ в предыдущем пункте, если за партой могут сидеть также и два мальчика, и две девочки?

## Задача 9. О числах маленьких и больших

- А. «Произведение двух чисел – это мелко и ничтожно! — кричал Незнайка. — Вот сумма – это другое дело! Глядите,  $1 + 5 > 1 \cdot 5$  и даже  $1 + 1000 > 1 \cdot 1000$ , вот как!» Докажите, тем не менее, что если числа  $a \geq 2$ ,  $b > 2$ , то их сумма строго меньше их произведения.

- В.** Единица, стоящая первой в числе  $1'000'000$  уверена, что при зачёркивании первой цифры числа от него остаётся сущий пустяк. Помогите ей разобраться, существуют ли натуральные числа, которые при зачёркивании первой цифры уменьшаются ровно в (а) 57 раз (б) 58 раз.
- С.** Пусть дано составное число  $n \geq 4$ . Докажите, что  $n$  можно представить в виде произведения нескольких (более одного) натуральных чисел, так что их сумма также равна  $n$ .

## Задача 10. Игра

- А.** 2017 единиц стоит в ряд, между ними поставлены плюсы. Двое по очереди ставят пары скобок в выражении так, что после каждого хода оно остаётся осмысленным, причём пару скобок нельзя ставить дважды на одни и те же места. Расставив 2016 пар скобок, они считают значение получившегося выражения — если оно чётно, выигрывает второй, иначе первый. Кто победит при правильной игре?
- В.** Даны две кучи камней: в одной 23 камня, вторая пока пустая. Также дан мешок с 2017 камнями. Разрешены два типа ходов. Можно брать 1, 2, 3 или 4 камня и перекладывать их из первой кучи во вторую. Также можно перекладывать 1, 2, 3 или 4 камня (если они там есть) из второй кучи в первую — при этом столько же камней, сколько взято, нужно выкинуть из мешка в окно. Играют двое; проигрывает тот, кто выкидывает последний камень из мешка. Кто победит при правильной игре?
- С.** Дана куча, в которой  $n$  камней. Играют двое; за ход можно убирать из кучи 1, 2, 3, ..., 8, 10, 12 или 14 камней. Выигрывает убравший последний камень. Кто победит при правильной игре? Не забудьте, что ответ должен зависеть от  $n$ .

## Задача 11. Возводим в степень

- А.** Приведите пример трёх подряд идущих натуральных чисел таких, что каждое из них делится на квадрат какого-нибудь простого числа.
- В.** Укажите наименьшее натуральное число такое, что его половина — квадрат натурального числа, его треть — куб натурального числа, а его пятая часть — пятая степень натурального числа.

- С. Докажите, что можно придумать сколь угодно длинную цепочку идущих подряд натуральных чисел, каждое из которых делится на квадрат какого-нибудь простого.

## Задача 12. Шутка

- А. Дана 200-этажная башня. Стул с 30 ножками скидывают с её крыши, и одновременно с этим более лёгкий стул совсем без ножек отправляют катиться вниз по лестнице внутри башни. Может ли безногий стул достигнуть земли быстрее, чем летящий?
- В. Выписка из дневника автора условий олимпиады «Математика НОН-СТОП»:

*Так, вчера я придумал всего четыре задачи... Мне снилось, что сегодня я придумаю в полтора раза больше задач, чем в сумме за день, когда сегодня останется вчера, и за день, для которого сегодня должно было наступить завтра... Однако в день, который будет вчера для завтра и был завтра для вчера, я придумал в три раза больше задач, чем за послезавтрашнее вчера... Что за сны-то такие странные в последнее время?..*

Если верить сну, сколько задач должен был придумать автор в день, когда он оставил эту заметку?

- С. Автомобиль выехал из Петербурга в Пекин и сломался через 80 километров. На исправление неполадок ушло, правда, всего две минуты. Однако, проехав ещё 40 километров, автомобиль вновь сломался, но вновь был отремонтирован за две минуты. Далее перед каждой следующей поломкой автомобиль проезжал вдвое меньше, чем перед предыдущей, но приводился в рабочее состояние за неизменные две минуты. Доедет ли он в итоге до Пекина?

## Задачи профильного варианта 7 класса

### Задача 1. Без нулей

*Двадцать восемь, двадцать девять, двадцать десять...*

Рассмотрим обыкновенную десятичную систему счисления и то, как в ней записываются натуральные числа. Мы хотим найти способ избавиться от нулей в записи этих чисел. Давайте вместо нуля введём цифру «десять», которую будем записывать как X и употреблять наравне с другими цифрами. После такой модификации системы счисления число 30, например, станет записываться как 2X, число 100 — как 9X, число 3107 — как 2XX7.

1. Переведите числа 110, 2202, 500'000 из десятичной системы счисления в модифицированную. Переведите числа 1X17, XXXX, 512 из модифицированной системы счисления в десятичную.
2. Объясните, почему всякое число имеет единственную запись в нашей модифицированной системе счисления.
3. Опишите алгоритм перевода чисел из десятичной системы в модифицированную и обратно.
4. Докажите, что запись числа в модифицированной системе счисления всегда не длиннее его записи в десятичной. Приведите пример, когда она строго короче десятичной.
5. Опишите правила сложения и умножения в столбик в модифицированной системе счисления (см. рис. R). Отличаются ли они от правил в обыкновенной десятичной системе?

$$\begin{array}{r}
 \times 1XX3 \\
 \hline
 4X7 \\
 \hline
 14721 \\
 1XX2X \\
 \hline
 8412 \\
 \hline
 X66221
 \end{array}$$

рис. R

6. Придумайте способ распространить модифицированную систему счисления и на неположительные числа. В частности, как записать ноль в этой системе счисления?
7. В модифицированной системе счисления попробуйте сформулировать признаки делимости на
  - 2, 4, произвольную степень двойки;
  - 5, 25, произвольную степень пятёрки;



- 3, 9;
- 11.

8. Что ещё можно сказать про модифицированную систему счисления? Как построить её аналог, используя двоичную систему вместо десятичной? Предложите свои направления исследования и изучите их.

## Задача 2. Дорога до метро

Рассмотрим клетчатую сетку, её рёбра и узлы. Путём между двумя узлами будем называть последовательность рёбер, их соединяющую. Длину пути в разных случаях будем определять по-разному, однако стандартный способ — понимать под длиной пути количество рёбер в нём.

Определим  $k$ -окрестность узла — это множество всех узлов, до которых от данного существует путь длиной не более чем  $k$ . На рисунке М1 изображены путь длины 3 и 3-окрестность центрального узла.

1. Длину пути можно ввести и по-другому. Давайте определим её как сумму величин смещения пути по горизонтали и по вертикали. Скажем, путь на рисунке М2 будет тогда иметь длину 5. Как будет выглядеть 4-окрестность фиксированного узла при так определённой длине?

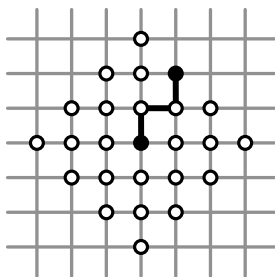


рис. М1

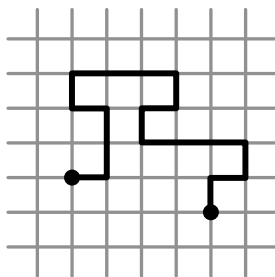


рис. М2

2. А если мы определим длину пути как максимум; как минимум; как модуль разности величин смещения по горизонтали и по вертикали?
3. Рассмотрим два определения длины пути: стандартным способом и как в пункте 1. Понятно, что один путь может иметь разную длину в первом и во втором смысле. Докажите, тем не менее, что любая  $k$ -окрестность в смысле первой длины и в смысле второй длины выглядит одинаково.

4. Пусть длина пути определена стандартным образом. Пусть узел  $B$  отстоит от узла  $A$  на  $m$  клеток вправо и на  $n$  клеток вниз. Сколько кратчайших путей ведут из  $A$  в  $B$ ?

Давайте теперь выберем из клетчатой сетки несколько узлов и некоторые рёбра между ними. Назовём выбранное нами *городом*. Расположим в каких-то из узлов города *станции метро*. Расстоянием от узла внутри города до данной станции метро будем называть длину (в стандартном смысле) кратчайшего пути между ними, лежащего внутри города. На рисунке М3 изображены пример города, пара станций метро, а также кратчайшие пути от одного из узлов до станций.

- 5) Для каждого узла в городе найдём ближайшую к нему станцию метро и расстояние до неё. Найдём в городе все узлы, в которых найденное расстояние достигает своего максимума. Теперь для каждого узла посчитаем сумму расстояний от него до всех станций метро и тоже найдём узлы, где эта сумма достигает максимального значения.

Придумайте город и расстановку в нём станций метро такую, что множества узлов, где максимально кратчайшее расстояние, и узлов, где максимальна сумма расстояний, не пересекаются.

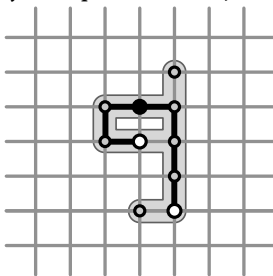


рис. М3

- 6) Докажите, что какой бы ни была расстановка станций метро в произвольном городе, максимальная сумма расстояний и максимальное среднее расстояние до станций всегда достигаются в одних и тех же узлах.
- 7) Для каждого узла в городе найдём самую далёкую от него станцию метро и расстояние до неё. Найдём в городе все узлы, в которых найденное расстояние достигает своего максимума.

Придумайте город и расстановку в нём станций метро такую, что три множества: узлов, где максимально кратчайшее расстояние; уз-

лов, где максимальна сумма расстояний; узлов, где максимально наибольшее расстояние — не пересекаются.

- 8) Какие ещё особенные узлы можно рассматривать в городе со станциями метро? Предложите свои направления исследования и изучите их.

## Задачи профильного варианта 8 класса

### Задача 1. Через тернии к звёздам

1. Рассмотрим вершины правильного  $n$ -угольника. Расстоянием  $d(A, B)$  между двумя вершинами будем называть длину кратчайшего пути между ними по сторонам  $n$ -угольника (см. рис. S1). Докажите, что для любых трёх вершин  $A, B, C$  выполнено неравенство  $d(A, B) + d(B, C) \geq d(A, C)$ .
2. Для данного  $n$ -угольника, сколько различных значений принимает расстояние между его вершинами? Для данной вершины, сколько других вершин  $n$ -угольника находятся на фиксированном расстоянии от неё? Сколько вершин  $n$ -угольника наиболее удалены от данной?
3. Обратите внимание на то, что расстояние между вершинами не меняется при вращении  $n$ -угольника. Попробуйте определить расстояние между вершинами так, чтобы оно менялось при поворотах многоугольника. Правда ли, что любое расстояние, сохраняющееся при вращении, отличается от нашего умножением на какое-то число?  
(7, 2)-звезда                      Не звезда

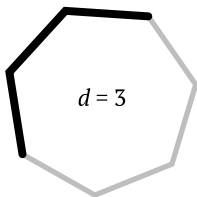


рис. S1

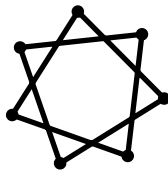
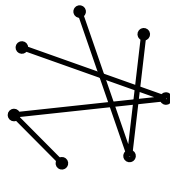


рис. S2



4. Фиксируем правильный  $n$ -угольник. Тогда  $(n, k)$ -звезда — минимальный набор замкнутых ломаных наименьшей длины такой, что

любые две вершины  $n$ -угольника, находящиеся на расстоянии  $k$  друг от друга, соединены ребром одной из ломаных набора (см. рис. S2). Сколько для данного  $n$  существует  $(n, k)$ -звёзд, состоящих из одной ломаной?

5. Для данных  $n$  и  $k$ , из скольки ломаных состоит  $(n, k)$ -звезда?
6. Для данных  $n$  и  $\ell$ , сколько  $(n, k)$ -звёзд состоит ровно из  $\ell$  ломаных?
7. Через  $\varphi(n)$  обозначим количество натуральных чисел, меньших  $n$  и взаимно простых с  $n$ . Используя свои знания о звёздах, докажите формулу

$$\sum_{d \text{ делит } n} \varphi(d) = n.$$

## Задача 2. Без нулей

*Двадцать восемь, двадцать девять, двадцать десять...*

Рассмотрим обыкновенную десятичную систему счисления и то, как в ней записываются натуральные числа. Мы хотим найти способ избавиться от нулей в записи этих чисел. Давайте вместо нуля введём цифру «десять», которую будем записывать как X и употреблять наравне с другими цифрами. После такой модификации системы счисления число 30, например, станет записываться как 2X, число 100 — как 9X, число 3107 — как 2XX7.

1. Переведите числа 110, 2202, 500'000 из десятичной системы счисления в модифицированную. Переведите числа 1X17, XXXX, 512 из модифицированной системы счисления в десятичную.
2. Объясните, почему всякое число имеет единственную запись в нашей модифицированной системе счисления.
3. Опишите алгоритм перевода чисел из десятичной системы в модифицированную и обратно.
4. Докажите, что запись числа в модифицированной системе счисления всегда не длиннее его записи в десятичной. Приведите пример, когда она строго короче десятичной.
5. Опишите правила сложения и умножения в столбик в модифицированной системе счисления (см. рис. R). Отличаются ли они от правил в обыкновенной десятичной системе?

$$\begin{array}{r}
 \phantom{0} \times \phantom{0} 1 \text{X} \text{X} 3 \\
 \phantom{0} \phantom{0} \phantom{0} 4 \text{X} 7 \\
 \hline
 \phantom{0} \phantom{0} \overset{7}{1} \overset{7}{4} \overset{2}{7} 2 1 \\
 \phantom{0} \overset{\text{X}}{1} \overset{\text{X}}{\text{X}} \overset{2}{2} \text{X} \\
 \phantom{0} \overset{4}{8} \overset{4}{4} \overset{1}{1} 2 \\
 \hline
 \overset{1}{\text{X}} \overset{1}{6} \overset{1}{6} \overset{2}{2} 2 1
 \end{array}$$

рис. R

6. Придумайте способ распространить модифицированную систему счисления и на неположительные числа. В частности, как записать ноль в этой системе счисления?
7. В модифицированной системе счисления попробуйте сформулировать признаки делимости на
  - 2, 4, произвольную степень двойки;
  - 5, 25, произвольную степень пятёрки;
  - 3, 9;
  - 11.
8. Что ещё можно сказать про модифицированную систему счисления? Как построить её аналог, используя двоичную систему вместо десятичной? Предложите свои направления исследования и изучите их.

### Задача 3. Дорога до метро

Рассмотрим клетчатую сетку, её рёбра и узлы. Путём между двумя узлами будем называть последовательность рёбер, их соединяющую. Длину пути в разных случаях будем определять по-разному, однако стандартный способ — понимать под длиной пути количество рёбер в нём.

Определим  $k$ -окрестность узла — это множество всех узлов, до которых от данного существует путь длиной не более чем  $k$ . На рисунке M1 изображены путь длины 3 и 3-окрестность центрального узла.

1. Длину пути можно ввести и по-другому. Давайте определим её как сумму величин смещения пути по горизонтали и по вертикали. Скажем, путь на рисунке M2 будет тогда иметь длину 5. Как будет выглядеть 4-окрестность фиксированного узла при так определённой длине?

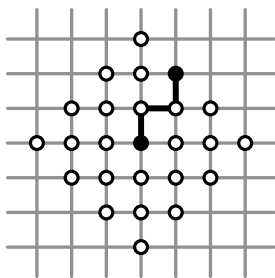


рис. М1

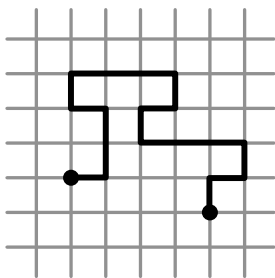


рис. М2

2. А если мы определим длину пути как максимум; как минимум; как модуль разности величин смещения по горизонтали и по вертикали?
3. Рассмотрим два определения длины пути: стандартным способом и как в пункте 1. Понятно, что один путь может иметь разную длину в первом и во втором смысле. Докажите, тем не менее, что любая  $k$ -окрестность в смысле первой длины и в смысле второй длины выглядит одинаково.
4. Пусть длина пути определена стандартным образом. Пусть узел  $B$  отстоит от узла  $A$  на  $m$  клеток вправо и на  $n$  клеток вниз. Сколько кратчайших путей ведут из  $A$  в  $B$ ?

Давайте теперь выберем из клетчатой сетки несколько узлов и некоторые рёбра между ними. Назовём выбранное нами *городом*. Расположим в каких-то из узлов города *станции метро*. Расстоянием от узла внутри города до данной станции метро будем называть длину (в стандартном смысле) кратчайшего пути между ними, лежащего внутри города. На рисунке М3 изображены пример города, пара станций метро, а также кратчайшие пути от одного из узлов до станций.

- 5) Для каждого узла в городе найдём ближайшую к нему станцию метро и расстояние до неё. Найдём в городе все узлы, в которых найденное расстояние достигает своего максимума. Теперь для каждого узла посчитаем сумму расстояний от него до всех станций метро и тоже найдём узлы, где эта сумма достигает максимального значения.

Придумайте город и расстановку в нём станций метро такую, что множества узлов, где максимально кратчайшее расстояние, и узлов, где максимальна сумма расстояний, не пересекаются.

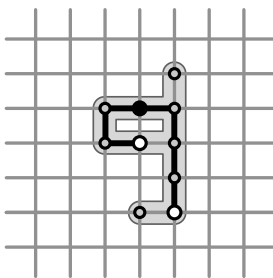


рис. М3

- 6) Докажите, что какой бы ни была расстановка станций метро в произвольном городе, максимальная сумма расстояний и максимальное среднее расстояние до станций всегда достигаются в одних и тех же узлах.
- 7) Для каждого узла в городе найдём самую далёкую от него станцию метро и расстояние до неё. Найдём в городе все узлы, в которых найденное расстояние достигает своего максимума.

Придумайте город и расстановку в нём станций метро такую, что три множества: узлов, где максимально кратчайшее расстояние; узлов, где максимальна сумма расстояний; узлов, где максимально наибольшее расстояние — не пересекаются.

- 8) Какие ещё особенные узлы можно рассматривать в городе со станциями метро? Предложите свои направления исследования и изучите их.

# Условия задач 2016 года

## Задачи 5 класса

### Задача 1. Шутка

- А. Стул с пятнадцатью ножками упал с лестницы из пяти ступенек и сломал одну ножку. Потом он упал с лестницы из десяти ступенек и сломал три ножки. Сколько ножек он сломает, упав с лестницы из 20 ступенек?
- В. За книгу заплатили 200 рублей, и осталось заплатить вдвое больше, чем осталось бы заплатить, если бы заплатили половину заплаченного и ещё столько, сколько осталось заплатить. Сколько стоит книга?
- С. Известно, что Магеллан израсходовал на день больше, чем рассчитывал, при движении с востока на запад. В свою очередь, герои книги «Вокруг света за 80 дней» сэкономили время при движении с запада на восток. Но можно ли изменить скорость времени, просто начав бегать вокруг Северного полюса?

### Задача 2. Числа и суммы

- А. Может ли число быть меньше количества цифр в нём? Может ли число быть меньше собственной суммы цифр?
- В. Как по натуральному числу  $n$  найти число, не превосходящее его, с наибольшей суммой цифр?
- С. Петя сложил все числа от 1 до  $m \cdot n$ , а Вася сложил все числа от 1 до  $m$ , от 1 до  $n$  и посчитал произведение этих двух сумм. У кого в итоге получилось большее число?



### Задача 3. Деление и остатки

- А.** В преддверии олимпиады «Математика НОН-СТОП» Настя решила поупражняться в делении чисел. Она придумала некоторое число, и у неё получилось, что это число делится на 564. Ещё она выяснила, что 2016 делится на это число. Права ли Настя?
- В.** Всё те же подруги теперь тренируются считать остатки от деления числа на число. Первая берёт число  $a$ , считает его остаток от деления на число  $b$ , а затем считает остаток от деления этого остатка на число  $c$ . Вторая утверждает, что процесс можно ускорить, сразу считая остаток от деления  $a$  на  $c$ , без потери правильности ответа. Права ли она? Если да, докажите это, если нет — приведите контр-пример.
- С.** Даны два числа  $b$  и  $c$ . Доказать, что для любого  $a$  выполнено  $(a \bmod b) \bmod c = a \bmod c$  тогда и только тогда, когда  $b$  делится на  $c$ .

### Задача 4. Спички и пионеры

- А.** Пионер Петя выкладывает цифры из спичек так, как это делается на экране стандартного калькулятора. Какое наибольшее число он может сложить из 15 спичек?
- В.** Могло ли случиться так, что в петином отряде из 20 пионеров имена у всех начинаются с разных букв?
- С.** Тем временем пионер Вася хочет научиться выкладывать цифры наименьшим числом спичек. Помогите ему в этом: найдите наименьшее число  $k$  такое, что любая цифра может быть выложена из  $k$  спичек.



рис. 6 — Экран стандартного калькулятора (шрифт Digitface)

### Задача 5. Плохая компания

- А.** В компании из 10 человек среди любых пятерых — не более трёх девочек. Какое наибольшее число девочек может быть в компании?

- В.** В стране  $140'000'000$  людей. Министру здравоохранения донесли, что среди 35 миллионов и одного человека всегда есть хоть один носитель опасного вируса Нойвис-припг. Министр прикинул в голове: это ведь получается, что ничтожно малая доля населения страны является носителем вируса! Прав ли он?
- С.** Дана компания из  $N$  человек. Известно, что из  $p$  людей по крайней мере  $q$  — девочки, а из  $s$  девочек по крайней мере  $t$  — блондинки. Какое наименьшее количество блондинок может быть в этой компании?

## Задача 6. Эти необычные механизмы

- А.** Федя собрал систему из шестерёнок, как на рисунке 1. Будут ли шестерёнки вращаться?
- В.** В японских шахматах сёги есть фигура Золото, которая бьёт шесть клеток вокруг себя (закрашены серым на рисунке 2). Можно ли расставить на поле  $9 \times 9$  несколько таких фигур, чтобы каждая клетка поля билась ровно одним Золотом?
- С.** Конструкция самосвала такова, что он может ехать, потеряв до четырёх колёс. Правда, его максимальная скорость, равная  $60$  км/ч, уменьшается на  $6$  км/ч с каждым потерянным колесом. Раз в  $12$  км на шоссе встречаются шиномонтажи, где разговор с работником занимает  $10$  минут, а установка каждого колеса — по  $3$  минуты. Сразу же после выезда с / проезда мимо очередного шиномонтажа у самосвала отваливается одно колесо. Сколько колёс выгоднее всего терять водителю между двумя заездами на шиномонтаж, если он хочет в среднем ехать как можно быстрее?

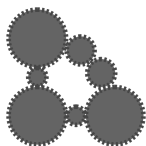


рис. 1

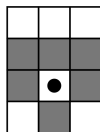


рис. 2

## Задачи 6 класса

### Задача 1. Падающие стулья

- А.** Стул с пятнадцатью ножками упал с лестницы из пяти ступенек и сломал одну ножку. Потом он упал с лестницы из десяти ступенек и сломал три ножки. Сколько ножек он сломает, упав с лестницы из 20 ступенек?
- В.** В кафе стоит  $n$  четырёхногих стульев. Ночью в кафе заходит мальчик Вася и начинает вслепую подпиливать стульям ножки. С утра стул упадёт под посетителем, если у него останутся неподпиленные меньше трёх ножек. Сколько ножек нужно подпилить Васе, чтобы с утра как минимум  $m$  посетителей кафе гарантированно упали?
- С.** В кафе  $n$  четырёхногих стульев. Стул падает, если у него меньше трёх целых ножек. У мальчиков Васи и Пети есть две пилы, и они изобретают себе игру. Мальчики уже сошлись на том, что первым ходит Петя, а проигрывает тот, после чьего хода упадёт первый стул. Осталось выбрать возможное число перепиливаний за ход для каждого из них. Пусть за каждый ход Петя перепиливает не менее чем  $a_1$  и не более чем  $b_1$  ножек, Вася — от  $a_2$  до  $b_2$  ножек. Числа  $a_1$  и  $a_2$  могут быть равны нулю или единице, а числа  $b_1$  и  $b_2$  —  $m$  или  $m - 1$ ,  $m < n$ , но при этом обязательно  $b_1 \neq b_2$ . Сколько игр удовлетворяет этим условиям, и кто из мальчиков выиграет в каждой из них?

### Задача 2. Детский сад

- А.** В детском саду 10 детей рисуют 10 рисунков за 20 минут. Как долго 50 детей будут рисовать 50 рисунков? Как долго  $d$  детей будут рисовать  $r$  рисунков?
- В.** Детсадовцам Вове и Диме выдали по обручу — обруч представляет собой диск радиусом  $r_1$ , из которого вырезан круг радиуса  $r_2$ ,  $r_2 < r_1$ . Мальчики стали клеить пластилин на выданные им обручи. За минуту Вова наращивал сантиметр пластилина на внешнем краю обруча, а Дима — сантиметр пластилина на внутреннем его краю. У кого из мальчиков площадь обруча росла быстрее?
- С.** В медпункт детского сада пришло четверо детей. У медсестры есть двухчашечные весы без гирь, и она хочет расположить детей по ве-

су. Сколько взвешиваний ей для этого нужно сделать? Как ей про-  
изводить взвешивания?

### Задача 3. Числа, выписанные на доску

- А. Коля в свой День рождения выписал на доску наименьшее число, дважды содержащее все цифры от 0 до 9 и делящееся на 72. Выпишите и вы это число!
- В. А Оля записала на доску числа от 1 до 121 и теперь занимается следующим: стирает с доски числа  $a$  и  $b$ , записывая вместо них разность вида  $a - 2b$  либо  $b - 2a$ . Могло ли в конце на доске остаться единственное число — ноль?
- С. На доску выписаны  $n$  чисел. Доказать, что одно из них или сумма нескольких рядом стоящих чисел непременно делится на  $n$ .

### Задача 4. Линии и сетки

- А. В стол вбиты 26 гвоздиков так, как показано на рисунке 5. Расстояние между соседними — 1 сантиметр. Помогите Любе пропустить по столу нитку длиной 25 сантиметров от гвоздика  $A$  к гвоздику  $B$  так, чтобы она касалась каждого гвоздика.
- В. На клетчатой бумаге начертили прямоугольник размерами  $a$  на  $b$ , по линиям сетки. Может ли проведённая на том же листе прямая пройти по  $a + b$  клеткам в составе этого прямоугольника?
- С. Среди треугольников с данным основанием  $l$  и данным периметром  $P$  найти треугольник с максимальной площадью.

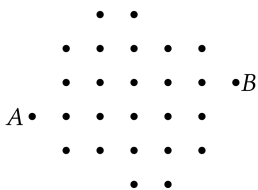


рис. 5

## Задача 5. Разделение на подмножества

- А.** Даны две компании из мальчиков, у каждого из которых есть сколько-то денег. Известно, что у любых пяти мальчиков из одной компании денег в сумме столько же, сколько у любых пяти мальчиков из другой компании. Могут ли суммарные количества денег в первой и во второй компаниях различаться?
- В.** Петя хочет покрасить единичные отрезки в составе прямой в два цвета так, чтобы среди любых четырёх подряд идущих отрезков было ровно два чёрных, а среди любых одиннадцати подряд идущих — ровно шесть чёрных. Может ли он это сделать?
- С.** На клетчатой бумаге водятся четыре вида муравьёв, ареал каждого представляет собой связное множество клеток. Ареалы разных видов могут пересекаться. Сколько возможных комбинаций видов муравьёв может жить в клетке? Изобразите ареалы видов муравьёв такие, что каждая комбинация видов реализуется хоть на одной клетке.

## Задача 6. Лыжная секция

- А.** Вначале лыжная секция состояла из одного-единственного участника — тренера, но потом в неё каждый день приходило либо 4, либо 5 новых участников. Могло ли в секции после нескольких дней насчитываться ровно 12 участников?
- В.** Трое лыжников вышли в лес, чтобы найти хорошее место для новой трассы. Лыжники встали на расстоянии по 100 метров друг от друга. В любой момент времени может двигаться только один лыжник, но при этом лишь по прямой, параллельной отрезку, соединяющему двух оставшихся лыжников. Пару часов покатавшись так по лесу, лыжники замерили расстояние друг между другом — получились цифры в 90, 120 и 150 метров. Докажите, что кто-то из лыжников не выполнял правила в течение поездки.
- С.** Из разных точек длинной кольцевой трассы одновременно стартовали 564 лыжника. Во время гонки лыжник мог обогнать другого, но не двоих лыжников сразу. Через некоторое время лыжники одновременно финишировали в тех же точках, из которых стартовали. Могло ли произойти нечётное число обгонов? А если один из лыжников заболел и не явился на старт?

## Задача 7. В поисках чисел

- А. Составляя условия олимпиады «Математика НОН-СТОП», мальчики Боря и Дима придумывают для участников математические ребусы: выражения, где разным буквам соответствуют разные цифры. Будут ли ребусы

$R \cdot O \cdot M \cdot A \cdot S \cdot H \cdot K \cdot A = \text{РОМАШКА}$  и  $Y \cdot O \cdot T \cdot L \cdot I \cdot C \cdot H \cdot I \cdot K = \text{УРАУРА}$   
иметь решение?

- В. Вася разбил числа от 3 до 8 включительно на четыре группы. Может ли его друг Рома наверняка утверждать, что произведение чисел в одной из этих групп больше 12?
- С. Для данного числа  $n$  предъявите алгоритм нахождения наименьшего составного числа  $N$  такого, что  $n!$  не делится на  $N$ , и докажите, что полученное составное число действительно будет наименьшим.

## Задача 8. Числа, цифры и приключения

- А. Девочка Маша открыла в песочнице магазин. Чтобы купить в этом магазине несколько спичек, нужно выложить из них цифру так, как на экране калькулятора, и дать Маше количество листочков, равное этой цифре. Как дешевле всего покупать спички у Маши?
- В. Фирма «DFS» разрабатывает особые космические бульдозеры. Для работы на астероиде под названием Гурбштекен был разработан специальный бульдозер, гусеницы которого делают ровно 953 оборота за 29 проходов по экватору астероида. Для удобства гусеницы бульдозера были разделены на 29 сменных секций, одну из которых пришлось заменить ещё в полёте. Наконец бульдозер принялся ездить вокруг астероида по экватору. Доказать, что вне зависимости от стартового положения гусениц свежеставленная секция рано или поздно окажется на линии старта. Как часто это будет повторяться?
- С. Вовочка неправильно запомнил доказательство теоремы Евклида. Он думает так: перемножим все простые числа, прибавим к произведению единицу — и полученное число непременно будет простым. Он хочет воспользоваться этим соображением для поиска простых чисел: перемножить несколько первых простых, прибавить единицу, получить новое простое. Докажите, что таким образом Вовочка всё равно рано или поздно получит составное число.



рис. 6 — Экран стандартного калькулятора (шрифт Digiface)

## Задачи 7 класса

### Задача 1. Деление и остатки

- А.** Две подруги в преддверии олимпиады «Математика НОН-СТОП» решили поупражняться в нахождении наибольших общих делителей и наименьших общих кратных пар чисел. Они взяли два числа  $a$  и  $b$ , и одна подруга получила  $\text{НОД}(a, b) = 564$ , а другая  $\text{НОК}(a, b) = 2016$ . Докажите, что кто-то из них ошибся.
- В.** Всё те же подруги теперь тренируются считать остатки от деления числа на число. Первая берёт число  $a$ , считает его остаток от деления на число  $b$ , а затем считает остаток от деления этого остатка на число  $c$ . Вторая утверждает, что процесс можно ускорить, сразу считая остаток от деления  $a$  на  $c$ , без потери правильности ответа. Права ли она? Если да, докажите это, если нет — приведите контрпример.
- С.** Даны два числа  $b$  и  $c$ . Доказать, что для любого  $a$  выполнено  $(a \bmod b) \bmod c = a \bmod c$  тогда и только тогда, когда  $b$  делится на  $c$ .

### Задача 2. Пятница

- А.** По пятницам мама наливает пятерым детям парного коровьего молока. Она делает это в два круга, в первый раз как-то наполняя пять кружек, а во второй раз расходуя горшок до конца так, что уровень молока во всех кружках становится одинаковым. После первого круга в кружках четырёх детей было одинаковое количество молока, а в кружке пятого было на 20% больше этого количества. Сколько миллилитров составляла эта самая двадцатипроцентная разница, если горшок имеет объём 2 литра, а на втором круге мама использовала 70% его объёма?

- В.** По пятницам в селе Хотчланд устраивались бега быков, но в качестве быков использовались тигры. У каждого тигра на ошейнике написаны два числа:  $q$  — во сколько раз этот тигр бежит быстрее человека и  $t$  — время в секундах, в течение которого этот тигр бежит с максимальной скоростью, а после этого ложится отдохнуть. Помогите участнику бегов Исинбаю Еленову вывести формулу для расстояния  $x$ , на котором ему нужно держаться от данного тигра, чтобы не быть съеденным.
- С.** У мальчика Дани пять пятниц на неделе, а у Кости — три пятницы на неделе. Сколько существует расстановок пятниц на неделе таких, что ровно два дня будут пятницей и для Дани, и для Кости?

### Задача 3. Эксперименты с клавиатурой

- А.** У братьев А. и Б. на клавиатурах начался *дребезг*: у А. все символы набирались пятикратно, а Backspace удалял сразу восемь последних напечатанных символов. У Б. символы набирались семь раз подряд, а Backspace удалял последние четыре напечатанных символа. При равной скорости нажатия на клавиши, кто из братьев будет печатать быстрее?
- В.** Починив дребезг, братья обнаружили другие неполадки: у А. сломалась клавиша Shift, а у Б. — Caps Lock. До поломки оба печатали с одинаковой скоростью: они нажимали по пять клавиш в секунду. Неисправности повлияли на скорость печати: теперь А. должен нажимать Caps Lock перед каждой последовательностью заглавных букв и ещё раз нажимать после неё, а Б. — удерживать Shift, чтобы печатать заглавные буквы: при этом его скорость падает до двух букв в секунду, но на нажатие Shift время не тратится. Вам нужно придумать строчку, которую А. напечатает минимум в два раза быстрее, чем Б. А есть ли строчка, которую Б. печатает в два раза быстрее, чем А.?
- С.** Через год у Б. на клавиатуре осталось две рабочих клавиши, да и печатать он стал медленнее: нажимает лишь четыре клавиши в секунду. Паузы в процессе набора информации не несут; две клавиши одновременно нажимать нельзя. Вам нужно придумать способ без уменьшения русского алфавита (признания каких-нибудь букв равными) набирать любую букву не более чем за секунду либо доказать, что такого способа нет. Если его нет, то какое минимальное



количество букв достаточно отождествить в одну, чтобы он появился?

## Задача 4. Факториалы

Факториалом числа  $n$  будем называть произведение всех натуральных чисел от 1 до  $n$ .

- А. Егор посчитал факториал числа 33 и записал его на бумажку. Его сестра решила пошалить, и стёрла одну из цифр факториала. Получилась запись:

$$33! = 8'683'317'618'811'886'49\square'518'194'401'280'000'000$$

Помогите Егору восстановить стёртую цифру.

- В. Посчитан факториал числа, не меньшего 12, и из его записи стёрта ровно одна цифра — причём известно, с какой позиции. Докажите, что её всегда можно однозначно восстановить, не вычисляя факториал заново.
- С. Докажите, что при кратном четырём  $n$  из произведения  $1! \cdot 2! \cdot 3! \cdot \dots \cdot n!$  можно вычеркнуть один факториал так, что оставшееся произведение будет квадратом целого числа.

## Задача 5. Ох уж эти школьницы!

- А. В течение четверти Арина получала оценки по математике. Она написала их в строку, поставила между какими-то знак умножения и посчитала получившееся произведение. У неё получилось 22887. Каков средний балл Арины за четверть?
- В. Ольга придумывает два натуральных числа и вычитает квадрат одного из квадрата другого. В некий момент у неё получилось 3476. Найдите придуманные ей числа.
- С. Девочка Лиана записывает пятизначные числа, переставляет их первую цифру в конец и записывает полученные числа в пару к исходным. Проходящая мимо мама сказала: «Лиана, а зачем ты пишешь пары чисел, сравнимых по модулю 41?» Права ли мама в своём вопросе — действительно ли числа в парах всегда сравнимы по этому модулю?

## Задача 6. Очень умные муравьи

- А.** На плоскости живут четыре муравья. Могут ли они нарисовать себе на плоскости четыре связные области так, чтобы любые два муравья могли бы общаться друг с другом — их области имели бы участок общей границы?
- В.** Человек соорудил муравьям планету, то есть подвесил в воздух коробку размером  $1 \times 1 \times 1$  метр. Через некоторое время он заметил, что муравьи организуют экспедиции к углам коробки, как будто ходят в горы. Рост муравья — 2мм. Подъёму на холм какой высоты для человека нормального роста соответствует восхождение муравья к углу коробки, если рост нормального человека (по мнению составителя задач, несомненно) равен двум метрам?
- С.** Счётное сообщество муравьёв хочет организовать на плоскости треугольную сетку такую, чтобы к каждой вершине прилегало ровно пять треугольников, жители которых могли бы попить чай в этой вершине. По силам ли муравьям это предприятие?

## Задача 7. Несправедливый турнир

Турнир по скоростному распиливанию проходит по усовершенствованной олимпийской системе. Изначально в турнире  $2^t$  участников,  $t \geq 2$ , все в одной группе, потом группа потихоньку дробится: в каждом раунде в каждой группе участники бьются на пары, в которых состязаются в распиливании, и после раунда образуются группа победителей и группа проигравших, где повторяется аналогичный турнир.

Так продолжается, пока все участники не побьются на группы по одному человеку: тогда места участников в итоговой таблице определяются естественным образом. В частности, победитель турнира — участник, выигравший во всех  $t$  раундах, а аутсайдер — проигравший во всех  $t$  раундах.

- А.** Может ли самый слабый участник турнира не оказаться аутсайдером?
- В.** Может ли состязавшийся сильнее как минимум половины участников турнира и ещё одного человека встретиться в финале с аутсайдером?

- С. Доказать, что для всякого состоящегося слабее половины участников турнира можно подобрать разбиение на пары в раундах так, чтобы в финале он встретился с аутсайдером.

## Задача 8. Дело-то житейское

- А. За книгу заплатили 200 рублей, и осталось заплатить втрое больше, чем осталось бы заплатить, если бы заплатили половину заплаченного и ещё столько, сколько осталось заплатить. Сколько стоит книга?
- В. В поисках нотного стана для очередной композиции гитарист Полина использует  $n$  сайтов. Известно, что на каждом сайте приведены ссылки на некоторые из числа оставшихся  $n - 1$  сайтов, и всегда по крайней мере одна. Доказать, что на каких-то двух сайтах приведено одинаковое число ссылок.
- С. Мальчик Саша очень любит писать олимпиады. В некоторый месяц в году он выписал подряд без пробелов все числа этого месяца, выделив цветом даты трёх предстоящих олимпиад. Выяснилось, что никакие две олимпиады не проходили в подряд идущие дни, и что все незакрашенные промежутки из цифр имеют одинаковую длину. Доказать, что первая цифра в выписанной Сашей строке была закрашена.

## Задача 9. День, когда Стёпа всё испортил

- А. Лиза обещала подарить Стёпе диск со всеми сериями «Adventure time», если он сможет досчитать на пальцах до 1023 так, что все числа будут показаны разными комбинациями пальцев. Как Стёпе заполучить желанный диск?
- В. Стёпа сломал весы Всезнамуса, случайно сдвинув стрелку на циферблате, но не поняв, на сколько делений именно. В шкафу у Всезнамуса лежат бутылка воды и кусок циркония. Как Стёпе определить, на сколько делений сдвинула стрелка, и починить весы?
- С. Придя домой, Стёпа уселся за свою любимую компьютерную игру — Portal. Один портал стоит на большой высоте на вертикальной стене. Стёпа вылетает из него, перед самым приземлением ставит под собой второй портал и попадает в него с тем, чтобы вновь вывалиться из первого портала на стене, причём параллельно земле.

Как быстро будет нижний портал отдаляться от стены? При прохождении через портал скорость Стёпы не изменяется.

## Задача 10. Хитрый Миша

- А. Миша подошёл к заведующему городским тиром с предложением открыть экспериментальный тир. Его зона имела бы форму равнобедренного треугольника со стрельбищем в вершине, а в конце дня награждались бы все, достигшие минимальной за этот день суммы расстояний от пулевой дырки до прямых, продолжающих боковые рёбра зоны. Докажите, что Миша тем самым разорит тир.
- В. Маша попросила Мишу вырезать из бумаги шесть развёрток для куба. Вместо этого Миша вырезал шесть крестиков, состоящих из пяти одинаковых тетрадных клеток каждый. Может ли Маша оклеить без наложений хоть какой-нибудь куб крестиками, вырезанными Мишей?
- С. Автор учебника по геометрии попросил Мишу набрать текст учебника. А Миша, как и следовало ожидать, допустил опечатку. В задаче, гласящей: «Отмерьте на одной стороне угла в  $60^\circ$   $20$  см, а на другой стороне —  $t$  см, и посчитайте расстояние между отмеченными точками», Миша намеренно увеличил  $t$  на  $4$  см, но при этом ответ на задачу остался верным. Чему равно  $t$ ?

## Задачи 8 класса

### Задача 1. Числа и суммы

- А. Может ли число быть меньше количества цифр в нём? Может ли число быть меньше собственной суммы цифр?
- В. Как по натуральному числу  $n$  найти число, не превосходящее его, с наибольшей суммой цифр?
- С. Петя сложил все числа от  $1$  до  $m \cdot n$ , а Вася сложил все числа от  $1$  до  $m$ , от  $1$  до  $n$  и посчитал произведение этих двух сумм. У кого в итоге получилось большее число?

## Задача 2. Детский сад

- А.** В детском саду 10 детей рисуют 10 рисунков за 20 минут. Как долго 50 детей будут рисовать 50 рисунков? Как долго  $d$  детей будут рисовать  $r$  рисунков?
- В.** Детсадовцам Вове и Диме выдали по обручу — обруч представляет собой диск радиусом  $r_1$ , из которого вырезан круг радиуса  $r_2$ ,  $r_2 < r_1$ . Мальчики стали клеить пластилин на выданные им обручи. За минуту Вова наращивал сантиметр пластилина на внешнем краю обруча, а Дима — сантиметр пластилина на внутреннем его краю. У кого из мальчиков площадь обруча росла быстрее?
- С.** В медпункт детского сада пришло четверо детей. У медсестры есть двухчашечные весы без гирь, и она хочет отсортировать детей по массе. Сколько взвешиваний ей для этого нужно сделать? Как ей производить взвешивания?

## Задача 3. Факториалы

Факториалом числа  $n$  будем называть произведение всех натуральных чисел от 1 до  $n$ .

- А.** Егор посчитал факториал числа 33 и записал его на бумажку. Его сестра решила пошалить, и стёрла одну из цифр факториала. Получилась запись:

$$33! = 8'683'317'618'811'886'49\Box'518'194'401'280'000'000$$

Помогите Егору восстановить стёртую цифру.

- В.** Посчитан факториал числа, не меньшего 12, и из его записи стёрта ровно одна цифра — причём известно, с какой позиции. Докажите, что её всегда можно однозначно восстановить.
- С.** Докажите, что при чётном  $n$  из произведения  $1! \cdot 2! \cdot 3! \cdot \dots \cdot n!$  можно вычеркнуть один факториал так, что оставшееся произведение будет квадратом целого числа.

## Задача 4. В поисках чисел

- А.** Составляя условия олимпиады «Математика НОН-СТОП», мальчики Боря и Дима придумывают для участников математические ребусы: выражения, где разным буквам соответствуют разные цифры.

Будут ли ребусы

$P \cdot O \cdot M \cdot A \cdot \text{Ш} \cdot K \cdot A = \text{РОМАШКА}$  и  $Я \cdot O \cdot T \cdot Л \cdot И \cdot Ч \cdot Н \cdot И \cdot K = \text{УРАУРА}$   
иметь решение?

- В.** Вася разбил числа от 3 до 8 включительно на четыре группы. Может ли его друг Рома наверняка утверждать, что произведение чисел в одной из этих групп больше 12?
- С.** Для данного числа  $n$  предъявите алгоритм нахождения наименьшего составного числа  $N$  такого, что  $n!$  не делится на  $N$ , и докажите, что полученное составное число действительно будет наименьшим.

## Задача 5. Проблемы завуча

- А.** На параллели 60 школьников ростом 161, 162, ..., 219, 220 сантиметров. Завуч хочет распределить их на три класса так, чтобы минимальный средний рост школьников в классе был максимален. Как ей это сделать?
- В.** Завуч, одновременно являясь преподавателем физики, демонстрирует детям абсолютно гибкий, но нерастяжимый и неповреждаемый металлический лист с вырезанным в нём круглым отверстием радиуса  $r$ . Монета какого максимального диаметра пролезет через это отверстие?
- С.** Теперь у завуча есть лист совершенно не гибкого стекла, также с вырезанным в нём круглым отверстием радиуса  $r$ . Какую длину должно иметь ребро очень шершавого куба, чтобы он не пролезал через это отверстие?

## Задача 6. Фигуры в шахматах

- А.** Какое минимальное количество клеток нужно пройти ферзю из точки  $(a, b)$  в точку  $(c, d)$  на шахматном поле?
- В.** Фигура Корблюд умеет делать из данной клетки на шахматном поле четыре хода так, как показано на рисунке 3. Доказать, что корблюд может прийти из любой клетки бесконечного шахматного поля в любую другую. А верно ли такое утверждение для Корблюда Диагонального, делающего ходы как на рисунке 4?

- С. Будем рассматривать фигуры, которые из данной клетки умеют делать четыре хода: вперёд-налево, вперёд-направо, назад-налево, назад-направо. При этом направо / налево фигура смещается лишь на одну клетку, а вперёд / назад каждый ход — либо на две, либо на три клетки. Сколько фигур, с точностью до симметрий, удовлетворяют этим свойствам, и какие из них могут из любой клетки бесконечного шахматного поля дойти до любой другой?

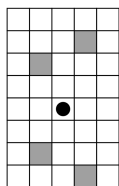


рис. 3

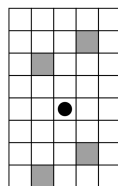


рис. 4

## Задача 7. Пятница

- А. По пятницам мама наливает пятерым детям парного коровьего молока. Она делает это в два круга, в первый раз как-то наполняя пять кружек, а во второй раз расходуя горшок до конца так, что уровень молока во всех кружках становится одинаковым. После первого круга в кружках четырёх детей было одинаковое количество молока, а в кружке пятого было на 20% больше этого количества. Сколько миллилитров составляла эта самая двадцатипроцентная разница, если горшок имеет объём 2 литра, а на втором круге мама использовала 70% его объёма?
- В. По пятницам в селе Хотчланд устраивались бега быков, но в качестве быков использовались тигры. У каждого тигра на ошейнике написаны два числа:  $q$  — во сколько раз этот тигр бежит быстрее человека и  $t$  — время в секундах, в течение которого этот тигр бежит с максимальной скоростью, а после этого ложится отдохнуть. Помогите участнику бегов Исинбаю Еленову вывести формулу для расстояния  $x$ , на котором ему нужно держаться от данного тигра, чтобы не быть съеденным.
- С. У мальчика Дани пять пятниц на неделе, а у Кости — три пятницы на неделе. Сколько существует расстановок пятниц на неделе таких, что ровно два дня будут пятницей и для Дани, и для Кости?

## Задача 8. Очень умные муравьи

- А.** На плоскости живут четыре муравья. Могут ли они нарисовать себе на плоскости четыре связанные области так, чтобы любые два муравья могли бы общаться друг с другом — их области имели бы участок общей границы?
- В.** Человек соорудил муравьям планету, то есть подвесил в воздух коробку размером  $1 \times 1 \times 1$  метр. Через некоторое время он заметил, что муравьи организуют экспедиции к углам коробки, как будто ходят в горы. Рост муравья — 2мм. Подъёму на холм какой высоты для человека нормального роста соответствует восхождение муравья к углу коробки, если рост нормального человека равен двум метрам?
- С.** Счётное сообщество муравьёв хочет организовать на плоскости треугольную сетку такую, чтобы к каждой вершине прилегало ровно пять треугольников, жители которых могли бы попить чай в этой вершине. По силам ли муравьям это предприятие?

## Задача 9. Эксперименты с клавиатурой

- А.** У братьев А. и Б. на клавиатурах начался *дребезг*: у А. все символы набирались пятикратно, а Backspace удалял сразу восемь последних напечатанных символов. У Б. символы набирались семь раз подряд, а Backspace удалял последние четыре напечатанных символа. При равной скорости нажатия на клавиши, кто из братьев будет печатать быстрее?
- В.** Починив дребезг, братья обнаружили другие неполадки: у А. сломалась клавиша Shift, а у Б. — Caps Lock. До поломки оба печатали с одинаковой скоростью: они нажимали по пять клавиш в секунду. Неисправности повлияли на скорость печати: теперь А. должен нажимать Caps Lock перед каждой последовательностью заглавных букв и ещё раз нажимать после неё, а Б. — удерживать Shift, чтобы печатать заглавные буквы: при этом его скорость падает до двух букв в секунду, но на нажатие Shift время не тратится. Вам нужно придумать строчку, которую А. напечатает минимум в два раза быстрее, чем Б. А есть ли строчка, которую Б. печатает в два раза быстрее, чем А.?



- С. Через год у Б. на клавиатуре осталось две рабочих клавиши, да и печатать он стал медленнее: нажимает лишь четыре клавиши в секунду. Паузы в процессе набора информации не несут; две клавиши одновременно нажимать нельзя. Вам нужно придумать способ без уменьшения русского алфавита (признания каких-нибудь букв равными) набирать любую букву не более чем за секунду либо доказать, что такого способа нет. Если его нет, то какое минимальное количество букв достаточно отождествить в одну, чтобы он появился?

## Задача 10. Первым делом — самолёты

- А. Комната освещена маленькой лампой, установленной на стене. Петя пускает бумажные самолётики так, что они пролетают перед лампочкой на её уровне. Вася же берётся определить, был пролетающий самолётик наклонён к лампочке или от лампочки, лишь по длине теней от его крыльев на противоположной стене. Как ему это сделать?
- В. Четыре маленьких вертолёта стоят на земле в вершинах квадрата  $1 \times 1$  метр. На какую высоту нужно взлететь двум из них, чтобы парные расстояния между вертолётами стали одинаковыми?
- С. По прямым, содержащим стороны правильного семиугольника со стороной в два километра, перемещаются камеры. Оператору Blue Origin было дано задание посадить ракету в этот семиугольник так, чтобы суммарное расстояние от неё до прямых, по которым ездят камеры, было минимальным. Куда оператору сажать ракету?

## Задача 11. Несправедливый турнир

Турнир по скоростному распиливанию проходит по усовершенствованной олимпийской системе. Изначально в турнире  $2^t$  участников,  $t \geq 2$ , все в одной группе, потом группа потихоньку дробится: в каждом раунде в каждой группе участники бьются на пары, в которых состязаются в распиливании, и после раунда образуются группа победителей и группа проигравших, где повторяется аналогичный турнир.

Так продолжается, пока все участники не побьются на группы по одному человеку: тогда места участников в итоговой таблице определяют естественным образом. В частности, победитель турнира — участник,

выигравший во всех  $t$  раундах, а аутсайдер — проигравший во всех  $t$  раундах.

- А. Может ли самый слабый участник турнира не оказаться аутсайдером?
- В. Может ли состязающийся сильнее как минимум половины участников турнира и ещё одного человека встретиться в финале с аутсайдером?
- С. Доказать, что для всякого состязающегося слабее половины участников турнира можно подобрать разбиение на пары в раундах так, чтобы в финале он встретился с аутсайдером.

## Задача 12. Попытки осмысления биссектрис

- А. У Робинзона Крузо есть стандартный советский чертёжный треугольник с углами в 30, 60 и 90 градусов. Как ему с помощью этого треугольника начертить на песке угол в 15 градусов?
- В. Мальчик по имени Текдра решил определять биссектрису трёхгранного угла следующим образом: проведём биссектрису одной из его граней, затем плоскость, проходящую через эту биссектрису и противоположное использованной грани ребро. Теперь проведём биссектрису угла в этой плоскости, образованного ребром и старой биссектрисой. Докажите, что определение Текдры некорректно — в одном трёхгранном угле можно построить несколько различных биссектрис.
- С. В треугольнике  $MNK$  проведены биссектрисы углов  $N$  и  $K$ . Из оставшейся вершины на эти биссектрисы опустили перпендикуляры и провели прямую через их основания. Доказать, что она будет параллельна стороне  $NK$ .

## Задачи профильного варианта 7 класса

### Задача 1. $(a, b)$ –слоны

«У какого верблюда три горба?»

На шахматном поле  $(a, b)$  – слоном будем называть фигуру, делающую ходы следующего рода: она идёт по диагонали на  $a$  клеток, поворачивается на  $90^\circ$  в какую-либо из сторон и идёт на  $b$  клеток по перпендикулярной диагонали. Пусть слон был изначально поставлен в какую-то клетку на бесконечном во все стороны шахматном поле. Будем называть эту клетку *начальной*.

1. (а) Сколько возможных ходов из начальной клетки может сделать  $(a, b)$ –слон,  $a \neq b$ ? (б) Правда ли, что  $(a, b)$ –слон тождественен  $(b, a)$ –слону? (в) Можно ли присвоить обычному шахматному слону какие-либо  $a$  и  $b$ ?
2. Введите на чёрных клетках шахматного поля раскраску в два цвета такую, что любой ход  $(1, 0)$ –слона меняет цвет клетки, на которой он стоит. При каких значениях  $(a, b)$  соответствующий слон может ходить только по клеткам одного из этих двух цветов? Как часто меняется цвет клетки, в которую приходит слон, при остальных значениях  $(a, b)$ ?
3. При каких значениях  $t$  возможно  $(1, t)$ –слоном за несколько ходов дойти до клетки, имеющей с начальной общую вершину? Постройте для таких  $t$  алгоритм дохождения, а для остальных докажите невозможность дохождения.
4. Пусть слон некоторым числом ходов может достичь клетки, имеющей с начальной общую вершину. Чему тогда может быть равен НОД  $(a, b)$ ?
5. Для класса значений  $(a, b)$ , которые одновременно удовлетворяют условиям, полученным вами в пунктах (2) и (4), проверить, может ли соответствующий  $(a, b)$ –слон попасть за несколько ходов в клетку, имеющую с начальной общую вершину. Вам требуется построить алгоритм попадания или доказать его невозможность для как можно большего числа слонов в классе.
6. *Слон Безу–Тьюринга*. Доказать, что если  $(a, b)$ –слон может дойти до клетки, имеющей с начальной общую вершину, на бесконечном шахматном поле, то он может сделать это и на вертикальной / горизонтальной бесконечной ленте ширины  $2 \cdot (a + b)$ , содержащей начальную и финишную клетки.
7. Теперь будем пытаться дойти до клетки, отстоящей от начальной на 2 по диагонали (соседней с соседней). Показать, что это можно

сделать любым  $(1, t)$ –слоном. Чему может быть равен НОД  $(a, b)$ , если это можно сделать  $(a, b)$ –слоном?

8. Описать всех  $(a, b)$ –слонов, с помощью которых можно дойти до клетки, отстоящей от начальной на 2 по диагонали, и при этом (а) с их помощью нельзя добраться до клетки, имеющей с начальной общую вершину (б) они не являются  $(2a, 2b)$ –слонами, где  $(a, b)$ –слон может дойти до клетки, имеющей с начальной общую вершину.

## Задача 2. Кошки на координатной плоскости

*«A radioactive cat has eighteen half-lives.»*

Начинающий экономист Пабло Огурито спешит на защиту своей научной работы по экономической геометрии. Ему нужно пройти к метро по крайне скользкой дорожке. Чтобы не упасть, Пабло идёт по ней исключительно прямо, из некоторой точки на одном торце дорожки к некоторой точке на другом её торце.

Около метро в обилии водятся кошки, все лоснящиеся и чёрные. В свою очередь, Пабло суеверен, но по-немецки. Он считает, что кошка, перебежавшая перед тобой дорогу слева направо (в том числе, если ты с ней встретился), приносит тебе несчастья, а кошка, перебежавшая дорогу справа налево — удачу (опять же, и в случае встречи с ней).

Кошки в количестве  $n$  штук сидят в некоторых точках на местности, Пабло стоит в некоторой точке на торце дорожки. Для каждой из кошек и для Пабло выбрана *финишная* точка, в которую направляется соответствующий персонаж в нашей истории. В момент времени  $t = 0$  всё сообщество из  $n$  кошек и одного Пабло начинает равномерное прямолинейное движение с тем расчётом, чтобы в момент времени  $t = 1$  оказаться каждый в своей финишной точке.

Введём дополнительное обозначение:  $[(a, b)..(c, d)]$  — прямоугольник со сторонами, параллельными осям координат, и двумя противоположными вершинами в точках  $(a, b)$  и  $(c, d)$ .

Вам предлагается ответить на следующие вопросы:

1. Пусть дорожка представляет из себя прямоугольник  $[(-2, -1)..(2, 1)]$ . П. находится в точке  $(2, 0)$ ,  $n = 1$ , единственная кошка сидит в точке  $(0, -1)$  и готова направиться в точку  $(0, 1)$ . Какие точки на противоположном конце дороги могут быть финишными для П., если он не хочет, чтобы кошка успела пересечь его путь до него?

2. Теперь дорожка представляет из себя прямоугольник  $[(0, 0)..(9, 3)]$ . П. стоит в точке  $(9, 1.5)$ ,  $n = 2$ : одна кошка направляется из  $(6, 3)$  в  $(6, 0)$ , другая — из  $(3, 0)$  в  $(3, 3)$ . Какие точки могут быть финишными для П., если он хочет, чтобы вторая кошка не успела перебежать ему дорогу? Какие точки могут быть финишными для П., если он также хочет зарядиться удачей от первой кошки?
3. Дорожка — всё ещё  $[(0, 0)..(9, 3)]$ , П. находится в точке  $(9, 1.5)$  и идёт в точку  $(0, 1.5)$ . Известно что есть две кошки — одна вертикально сверху направляется в точку  $(3, 0)$ , другая — вертикально снизу в точку  $(6, 3)$ . Какие точки могут быть стартовыми для этих двух кошек, если П. хочет, чтобы первая кошка успела перебежать ему дорогу, а вторая — нет?
4. Дорожка — снова  $[(0, 0)..(9, 3)]$ , и П. направляется из точки  $(9, 1.5)$  в точку  $(0, 1.5)$ . Придумать расстановку на местности четырёх кошек такую, что одновременно (а) стартовая точка каждой кошки есть финишная для какой-то другой кошки (б) финишная точка каждой кошки есть стартовая для какой-то другой кошки (в) никакие две кошки не стартуют из одной точки и не финишируют в одну точку (г) ровно две кошки успевают перебежать дорогу П. справа налево, и ни одна — слева направо.
5. Могут ли в условиях предыдущего пункта три кошки перебежать П. дорогу справа налево?
6. Теперь дорога — прямоугольник  $[(0, 0)..(12, 12)]$ , П. направляется из точки  $(12, 9)$  в точку  $(0, 3)$ . Предъявить такие  $a$  и  $b$ , что кошка, идущая из точки  $(x, a)$  в точку  $(x, b)$ , обязательно перебежит дорогу П. при любом вещественном  $x$ ,  $0 \leq x \leq 12$ .
7. Выведите формулы для координат  $x(t)$  и  $y(t)$  кошки, равномерно и прямолинейно направляющейся из точки  $(a, b)$  в точку  $(c, d)$ , в зависимости от времени  $t$ ,  $0 \leq t \leq 1$ .

## Задачи профильного варианта 8 класса

### Задача 1. $(a, b)$ –слоны

*«У какого верблюда три горба?»*

На шахматном поле  $(a, b)$ –слоном будем называть фигуру, делающую ходы следующего рода: она идёт по диагонали на  $a$  клеток, поворачивается на  $90^\circ$  в какую-либо из сторон и идёт на  $b$  клеток по перпендикулярной диагонали. Пусть слон был изначально поставлен в какую-то клетку на бесконечном во все стороны шахматном поле. Будем называть эту клетку *начальной*.

1. (а) Сколько возможных ходов из начальной клетки может сделать  $(a, b)$ –слон,  $a \neq b$ ? (б) Правда ли, что  $(a, b)$ –слон тождественен  $(b, a)$ –слону? (в) Можно ли присвоить обычному шахматному слону какие-либо  $a$  и  $b$ ?
2. Введите на чёрных клетках шахматного поля раскраску в два цвета такую, что любой ход  $(1, 0)$ –слона меняет цвет клетки, на которой он стоит. При каких значениях  $(a, b)$  соответствующий слон может ходить только по клеткам одного из этих двух цветов? Как часто меняется цвет клетки, в которую приходит слон, при остальных значениях  $(a, b)$ ?
3. При каких значениях  $t$  возможно  $(1, t)$ –слоном за несколько ходов дойти до клетки, имеющей с начальной общую вершину? Постройте для таких  $t$  алгоритм дохождения, а для остальных докажите невозможность дохождения.
4. Пусть слон некоторым числом ходов может достичь клетки, имеющей с начальной общую вершину. Чему тогда может быть равен НОД  $(a, b)$ ?
5. Для класса значений  $(a, b)$ , которые одновременно удовлетворяют условиям, полученным вами в пунктах (2) и (4), проверить, может ли соответствующий  $(a, b)$ –слон попасть за несколько ходов в клетку, имеющую с начальной общую вершину. Вам требуется построить алгоритм попадания или доказать его невозможность для как можно большего числа слонов в классе.
6. *Слон Безу–Тьюринга*. Доказать, что если  $(a, b)$ –слон может дойти до клетки, имеющей с начальной общую вершину, на бесконечном шахматном поле, то он может сделать это и на вертикальной / горизонтальной бесконечной ленте ширины  $2 \cdot (a + b)$ , содержащей начальную и финишную клетки.
7. Теперь будем пытаться дойти до клетки, отстоящей от начальной на 2 по диагонали (соседней с соседней). Показать, что это можно

сделать любым  $(1, t)$ –слоном. Чему может быть равен НОД  $(a, b)$ , если это можно сделать  $(a, b)$ –слоном?

8. Описать всех  $(a, b)$ –слонов, с помощью которых можно дойти до клетки, отстоящей от начальной на 2 по диагонали, и при этом (а) с их помощью нельзя добраться до клетки, имеющей с начальной общую вершину (б) они не являются  $(2a, 2b)$ –слонами, где  $(a, b)$ –слон может дойти до клетки, имеющей с начальной общую вершину.

## Задача 2. Кошки на координатной плоскости

*«A radioactive cat has eighteen half-lives.»*

Начинающий экономист Пабло Огурито спешит на защиту своей научной работы по экономической геометрии. Ему нужно пройти к метро по крайне скользкой дорожке. Чтобы не упасть, Пабло идёт по ней исключительно прямо, из некоторой точки на одном торце дорожки к некоторой точке на другом её торце.

Около метро в обилии водятся кошки, все лоснящиеся и чёрные. В свою очередь, Пабло суеверен, но по-немецки. Он считает, что кошка, перебежавшая перед тобой дорогу слева направо (в том числе, если ты с ней встретился), приносит тебе несчастья, а кошка, перебежавшая дорогу справа налево — удачу (опять же, и в случае встречи с ней).

Кошки в количестве  $n$  штук сидят в некоторых точках на местности, Пабло стоит в некоторой точке на торце дорожки. Для каждой из кошек и для Пабло выбрана *финишная* точка, в которую направляется соответствующий персонаж в нашей истории. В момент времени  $t = 0$  всё сообщество из  $n$  кошек и одного Пабло начинает равномерное прямолинейное движение с тем расчётом, чтобы в момент времени  $t = 1$  оказаться каждый в своей финишной точке.

Введём дополнительное обозначение:  $[(a, b)..(c, d)]$  — прямоугольник со сторонами, параллельными осям координат, и двумя противоположными вершинами в точках  $(a, b)$  и  $(c, d)$ .

Вам предлагается ответить на следующие вопросы:

1. Пусть дорожка представляет из себя прямоугольник  $[(-2, -1)..(2, 1)]$ . П. находится в точке  $(2, 0)$ ,  $n = 1$ , единственная кошка сидит в точке  $(0, -1)$  и готова направиться в точку  $(0, 1)$ . Какие точки на противоположном конце дороги могут быть финишными для П., если он не хочет, чтобы кошка успела пересечь его путь до него?

2. Теперь дорожка представляет из себя прямоугольник  $[(0, 0)..(9, 3)]$ . П. стоит в точке  $(9, 1.5)$ ,  $n = 2$ : одна кошка направляется из  $(6, 3)$  в  $(6, 0)$ , другая — из  $(3, 0)$  в  $(3, 3)$ . Какие точки могут быть финишными для П., если он хочет, чтобы вторая кошка не успела перебежать ему дорогу? Какие точки могут быть финишными для П., если он также хочет зарядиться удачей от первой кошки?
3. Дорожка — всё ещё  $[(0, 0)..(9, 3)]$ , П. находится в точке  $(9, 1.5)$  и идёт в точку  $(0, 1.5)$ . Известно что есть две кошки — одна вертикально сверху направляется в точку  $(3, 0)$ , другая — вертикально снизу в точку  $(6, 3)$ . Какие точки могут быть стартовыми для этих двух кошек, если П. хочет, чтобы первая кошка успела перебежать ему дорогу, а вторая — нет?
4. Дорожка — снова  $[(0, 0)..(9, 3)]$ , и П. направляется из точки  $(9, 1.5)$  в точку  $(0, 1.5)$ . Придумать расстановку на местности четырёх кошек такую, что одновременно (а) стартовая точка каждой кошки есть финишная для какой-то другой кошки (б) финишная точка каждой кошки есть стартовая для какой-то другой кошки (в) никакие две кошки не стартуют из одной точки и не финишируют в одну точку (г) ровно две кошки успевают перебежать дорогу П. справа налево, и ни одна — слева направо.
5. Могут ли в условиях предыдущего пункта три кошки перебежать П. дорогу справа налево?
6. Теперь дорога — прямоугольник  $[(0, 0)..(12, 12)]$ , П. направляется из точки  $(12, 9)$  в точку  $(0, 3)$ . Предъявить такие  $a$  и  $b$ , что кошка, идущая из точки  $(x, a)$  в точку  $(x, b)$ , обязательно перебежит дорогу П. при любом вещественном  $x$ ,  $0 \leq x \leq 12$ .
7. Выведите формулы для координат  $x(t)$  и  $y(t)$  кошки, равномерно и прямолинейно направляющейся из точки  $(a, b)$  в точку  $(c, d)$ , в зависимости от времени  $t$ ,  $0 \leq t \leq 1$ .

### Задача 3. Рекуррентные функции

*«Нужно просто сесть на сороковой трамвай и посчитать.»*

Будем понимать функцию как чёрный ящик, который по нескольким натуральным числам выдаёт новое натуральное число. Нам понадобятся функции от одного и от двух аргументов — соответственно, на вход они принимают одно или два числа.



1. Рассмотрим функцию  $f$  от двух аргументов. Известно, что  $f(a, b) = f(b, a)$ , значение  $f(a, 0)$  определено однозначно для каждого  $a$ , и если  $a > b$ , то  $f(a, b) = f(a - b, b)$ . Доказать, что в таком случае функция  $f$  однозначно определена для всех значений  $(a, b)$ .
2. Пусть при тех же условиях  $f(a, 0) = a$ . Чему равно  $f(a, b)$ ?
3. Что произойдёт со значением  $f(a, b)$ , если  $f(a, 0)$  определять иным образом?
4. Поменяем определение функции  $f$ . По прежнему  $f(a, b) = f(b, a)$  и  $f(a, 0)$  заранее известно, но теперь  $f(a, b) = T(f(a - b, b))$ , где  $T(x)$  — некоторая функция от одной переменной. Доказать, что значение  $f(a, b)$  снова однозначно определено для всех пар  $(a, b)$ .
5. Пусть  $T(x) = x + k$ , где  $k$  — некоторое натуральное число;  $f(a, 0)$  определено каким-либо образом. Чему в таком случае равно  $f(a, b)$ ?
6. Рассмотрим функцию  $h$  от двух аргументов. Про неё известно следующее:
  - (а)  $h(ac, b) = h(a, b) \cdot h(c, b)$  для любых  $a, b, c$ ;
  - (б)  $h(a, bc) = h(a, c) \cdot h(a, b)$  для любых  $a, b, c$ ;
  - (в)  $h(a, b) = h(a \bmod b, b)$  при  $a > b$ ;
  - (г)  $h(1, t)$ ,  $h(2, t)$ ,  $h(t, 1)$ ,  $h(t, 2)$  определены однозначно и заранее;
  - (д)  $h(p_1, p_2) = T(h(p_2, p_1))$ , где  $p_1, p_2$  — нечётные простые числа,  $p_1 < p_2$ ,  $T$  — некоторая функция от одной переменной.

Доказать, что значение  $h(a, b)$  однозначно определено для всех значений  $(a, b)$ .

# Задачи 2018 года

## Задачи 4 класса

### Задача 1. Где-то я это уже видел

- А. Первое число в дате (оно соответствует дню в месяце) меняется от 1 до 31, а второе (соответствует месяцу) — от 1 до 12. С другой стороны, как мы знаем, часы пронумерованы от 0 до 23, а минуты — от 0 до 59.

Таким образом, днём в месяце и одновременно часом могут быть числа от 1 до 23, а месяцем и одновременно минутой — от 1 до 12. Кроме того, в каждом месяце точно есть хотя бы 23 дня.

Поэтому ответ —  $23 \cdot 12 = 276$ .

- В. Давайте всегда использовать «развёрнутую» дату. Тогда любой месяц (от 1 до 12) может стоять на месте часа, а любой день (от 1 до 31) на месте минуты. Ответ — все дни в году.
- С. Есть всего 12 букв русского алфавита, похожих на буквы английского алфавита (ГОСТ Р 50577-93):

**А, В, Е, К, М, Н, О, Р, С, Т, Х, У.**

Жирным мы отметили гласные — их всего 4; соответственно, согласных 8. Выбрать сочетание «гласная-согласная-согласная» можно  $4 \cdot 8 \cdot 8$  способами, а «гласная-гласная-согласная» —  $4 \cdot 4 \cdot 8$  способами. Вариантов для числа на номере всегда ровно 1000 — от 000 до 999.

Когда гласная одна, она может стоять на одном из трёх мест, поэтому ответ в таком случае будет равен

$$3 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 1000.$$

Когда гласных две, согласная может стоять на одном из трёх мест. Поэтому ответ —

$$3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 1000.$$

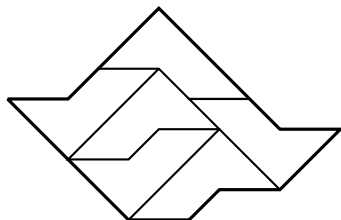
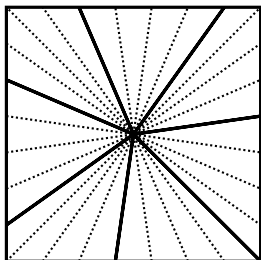
## Задача 2. Напрасно называют север крайним

- А.** Это задача–шутка: принималось большинство ответов, хотя, например понятно, что туристическая группа на 10–градусном морозе отморозит себе половину ног, а на 20–градусном — все.
- В.** Все долготы Земного шара оказываются очень близко друг к другу около полюсов. Так что, возможно, Мюнхгаузен просто обошёл по кругу (скажем, километровому) Северный или Южный полюс.
- С.** Пусть четыре города —  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$  расположены очень близко друг к другу — попарно на расстоянии в один километр. А пятый город —  $A$  — очень далеко, в 100 километрах. Пусть больше нет никаких городов. Тогда  $A$  должен быть соединён дорогой с какими-то из четырёх оставшихся городов, но ни один из тех городов не должен быть соединён с  $A$ .

## Задача 3. Разрезания

- А.** Поделим каждую из сторон квадрата на семь равных отрезков и рассмотрим 28 треугольников, получающихся, если соединить центр квадрата с краями каждого из этих отрезков. Все эти треугольники имеют одинаковую площадь (так как у них одинаковы основание и высота) и равные длины сторон, лежащие на сторонах квадрата (по построению).

Чтобы получить 7 многоугольников, требуемых в условии, объединим по четыре соседних треугольника — смотреть рисунок:

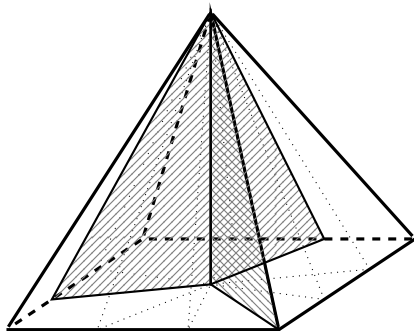


**В.** Смотреть рисунок выше.

**С.** Аналогично тому, что было проделано в первом пункте данной задачи, мы умеем резать квадрат на три многоугольника равной площади с равной длиной сторон, лежащих на сторонах квадрата.

Разрежем каждый квадратный «слой» пирамиды на три таких многоугольника одинаковым образом (с точностью до подобия). Тогда в объединении всех слоёв получатся три многогранника одинакового объёма, несущие на себе одинаковое количество краски («выходящие» на стороны пирамиды одинаковой площадью своей границы).

Смотреть рисунок:



## Задача 4. Летающий цирк

**А.** Все слова в этой задаче состоят из букв А, М, Р, С, Т. Постараемся поставить эти буквы в соответствие с действиями Лэмберта. Для этого составим таблицу: сколько каких букв находится в словах, адресованных Лэмберту.

	А	М	Р	С	Т
МАТРАС	2	1	1	1	1
СТАРТ	1	0	1	1	2
МАРС	1	1	1	1	0

Услышав слово «МАТРАС», Лэмберт среди прочего поёт два куплета из песни — значит, буква 'А' отвечает за куплеты. По аналогичным причинам (посмотрим, каких букв две в слове «СТАРТ»), 'Т' — это ноги в коробке. 'М' — это то, чего нет в слове «СТАРТ», но есть в «МАТРАС» — это надевание ведра.

Для 'Р' и 'С' остаются снятие перчаток и „Караул!“ — но нам неважно, что из действий какой букве соответствует, потому что 'Р' и 'С' встречаются во всех рассматриваемых словах по одному разу.

Отсюда ответ: Лэмберт закричит „Караул!“, споёт один куплет, наденет на голову ведро и снимет перчатки.

- В.** Да, джентльмен сможет купить себе шляпу, так как цена, называемая продавцом, не возрастает (пока финансовые возможности джентльмена остаются ниже её), а количество финансов, имеющееся у джентльмена, на каждом шаге растёт ровно на 1.

Можно также явно проделать процедуру, описанную в задаче, и выяснить, через сколько именно шагов шляпа окажется у джентльмена (получится точно меньше десяти) — но мы не будем делать этого здесь, оставив читателю в качестве упражнения.

- С.** Пусть Тревор преувеличивает всё в  $a$  раз, а Джереми — преуменьшает в  $b$  раз, а кот стоит  $s$  рублей. Тогда, из условия задачи,

$$s \cdot a = 9600$$

$$a \div b = 4$$

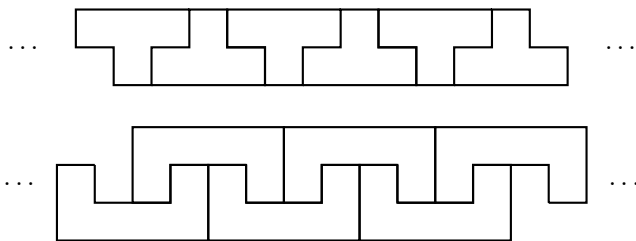
$$s \cdot a \div b = 2400$$

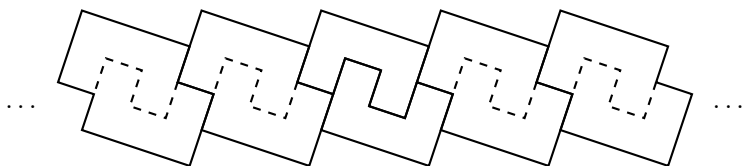
$$s \div b = 150$$

Сравнив первое и третье равенства, получаем, что  $b = 4$ . Подставив найденное  $b$  в четвертое равенство, получим  $s = 600$ .

## Задача 5. Мощения

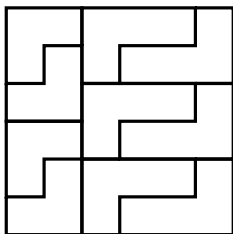
- А.** Из этой фигуры можно собрать горизонтальную полоску ширины 2, которой очевидно можно замостить плоскость (смотреть рисунок).





**В.** Из второй фигуры можно собрать горизонтальную полосу ширины 3, которой очевидно можно замостить плоскость. Из первой же фигуры соберём «лесенку» (смотреть рисунок выше): так как и верхний, и нижний её край имеет вид «на три клетки вправо–на клетку вверх», этой лесенкой можно замостить плоскость, прикладывая её к себе.

**С.** Смотреть рисунок:



## Задача 6. Ужасный гадкий аккуратный подсчёт

**А.** Квадратов  $1 \times 1 - 4 \cdot 5 = 20$  штук. Квадратов размером  $2 \times 2 - 3 \cdot 4 = 12$  штук. Квадратов  $3 \times 3$  и  $4 \times 4 - 6$  и 2 соответственно. Таким образом, всего квадратов

$$20 + 12 + 6 + 2 = 40.$$

Количество прямоугольников можно посчитать более «продвину-тым» образом: заметим, что прямоугольников размером  $a \times b$  можно найти ровно  $(4 - a + 1) \cdot (5 - b + 1)$  штук. Число  $a$  меняется от 0 до 4 — отсюда  $4 - a + 1$  меняется в тех же пределах. То же самое с  $5 - b + 1$  — оно меняется от 0 до 5.

Отсюда можно заключить, что сумма чисел вида  $(4 - a + 1) \cdot (5 - b + 1)$  при всевозможных  $a$  и  $b$  будет равна сумме всех чисел вида  $a \cdot b$ . Как посчитать сумму всех чисел вида  $a \cdot b$ ? Заметим, что при раскрытии скобок в произведении

$$(1 + 2 + 3 + 4 + 5) \cdot (1 + 2 + 3 + 4)$$

получится сумма из всех слагаемых, которые нам нужны. Отсюда прямоугольников можно найти  $15 \cdot 10 = 150$  штук.

**В.** Всего раскрасок  $n!$  — в «первом» секторе может стоять  $n$  цветов, в следующем —  $n - 1$ , и так далее. Из одной раскраски вращением круга можно получить ровно  $n$  раскрасок (включая её саму) — поэтому ответ равен  $\frac{n!}{n} = (n - 1)!$ .

**С.** В верхней полосе может стоять один из шести имеющихся цветов. Во второй полосе — любой из шести цветов, кроме уже стоящего в первой. В нижней полосе — любой из цветов, кроме уже стоящего во второй. Таким образом, ответ —  $6 \cdot 5 \cdot 5 = 150$ .

## Задачи 5 класса

### Задача 1. Летающий цирк

Смотреть задачу 4 варианта 4 класса.

### Задача 2. Рукопожатия

**А.** Давайте «расклеим» восьмёрку, превратив её в обычный круглый хоровод — тогда существо, стоящее в центре восьмёрки, «продублируется». Если оно было крабом, то получится хоровод из 19 крабов и 17 пауков; в противном случае — 18 крабов и 18 пауков. Если в круговом хороводе крабов больше, чем пауков, то какие-то два краба неизбежно будут держаться за лапы, что запрещено.

Отсюда можно заключить, что в центре стоял паук. Придумать хоровод, соответствующий условию, с пауком в центре не представляет ни малейшего труда.

**В.** Могло оказаться так, что ровно один человек в компании выиграл машину. Построим соответствующий пример. Возьмём «победителя» — у него есть пять друзей. У каждого из них есть ещё по четыре друга (кроме выигравшего машину), пусть все эти друзья различны.  $1 + 5 + 4 \cdot 5$  — у нас получилось 26 человек, от каждого из которых не более чем два рукопожатия до выигравшего машину человека.

Однако, для того чтобы довести пример до конца, нам надо установить дружеские связи между людьми, у которых их пока меньше 5 — а именно, между теми, от кого до победителя лотереи два рукопожатия (их 20 человек). Каждому из них нужно «изобрести» ещё по 4 друга.

Поступим просто: поставим эти 20 человек по кругу в произвольном порядке и назначим друзьями каждого двух его правых соседей и двух его левых соседей. Задача решена.

- С. Пусть внутренних рейсов в Авиаландии ровно  $M$ , а международных из неё — ровно  $N$ . Каждый внутренний рейс имеет в Авиаландии два «конца», а каждый международный — только один. Всего в городе Авиаландии прибывает  $5 \cdot 6 = 30$  рейсов. Получаем

$$2 \cdot M + N = 30.$$

Отсюда  $N$  должно быть чётным числом (так как  $2 \cdot N$  — чётное).

### Задача 3. Современная мебельная фабрика

- А. Закроем один из открытых ящиков, открыв тот, что через два ящика «налево» от него. Затем закроем его, открыв следующий, ещё через два ящика слева. На четвёртом шаге мы закроем два ящика, один из которых был противоположным исходному.

- В. При первом сценарии после действий Фёдора в ведре осталось  $\frac{6}{10}$  красителя, разведённого там Сергеем, так как 4 литра раствора из 10 были вылиты.

При втором сценарии Фёдор сначала выливал обычный раствор, а затем — раствор с меньшей концентрацией красителя. То есть, количества красителя в ведре до выливания двух литров и после отличались в 0.8 раз. В итоге в ведре осталось  $\frac{8}{10} \cdot \frac{8}{10} = 0.64$  от исходного красителя.

Ответ: больше красителя осталось во второй день.

- С. Экспериментальный стул с использованием нанотехнологий (одна из инноваций заключается, например, в том, что у такого стула ровно 720 ножек) падает с лестницы (в качестве испытания, разумеется). Выяснилось, что при падении он потерял в три раза меньше ножек, чем у него бы осталось, потеряй он в три раза меньше ножек, чем у него осталось сейчас. Так сколько же ножек осталось у стула?



Пусть стул потерял  $t$  ножек. Составим уравнение:

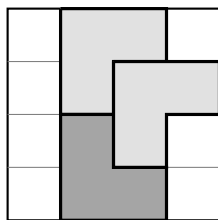
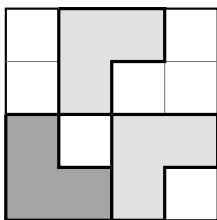
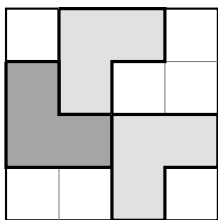
$$t = \frac{1}{3} \cdot \left( 720 - \underbrace{\frac{1}{3} \cdot (720 - t)}_{\substack{\text{чем у него} \\ \text{осталось} \\ \text{сейчас} \\ \text{в три раза меньше} \\ \text{ножек}}} \right)$$

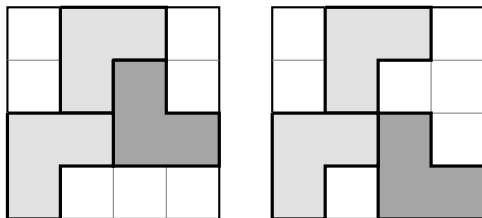
осталось бы, потеряй он

Это линейное уравнение. Его решение —  $t = 180$ . Это и есть ответ на данную задачу.

## Задача 4. Игры

- А.** Выигрышная стратегия есть у первого игрока: первым ходом он должен положить игровую фигуру в центр прямоугольника, разделив его на две равных непересекающихся фигуры — а затем ему достаточно повторять ходы, сделанные вторым игроком в одной из фигур, симметрично в другой фигуре. Понятно, что если второй смог сделать ход, то первый тоже сможет.
- В.** Выигрышная стратегия есть у второго игрока: пока он находится сзади, первый может делать только ходы по одному шагу вперёд. Второму надо следовать за ним — и когда тот шагнёт в клетку №301 (второй будет стоять в 229-ой), перепрыгнуть через него и выиграть.
- С.** Первому надо вырезать свою букву 'Г' по центру верхней стороны квадрата. То, что он выигрывает после этого, доказывается перебором возможных ходов второго игрока (смотреть рисунок): после каждого возможного хода первый игрок может походить так, что буква 'Г' второго игрока не может быть вписана никуда.





## Задача 5. Прогрессивное сложение

А.  $95500 > 50095$ .

В. Если ни одно из трёх чисел  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  не является префиксом другого, то всё просто: надо отсортировать числа лексикографически и сложить в порядке «от большего к меньшему». Если одно из чисел — префикс другого (например,  $P$  — префикс  $Q$ ), то всё не так однозначно: надо сравнить их общую первую цифру и первую цифру  $Q$ , следующую за вхождением  $P$  в  $Q$ . Если второе больше, то надо ставить  $Q$  перед  $P$ , иначе —  $P$  перед  $Q$ .

Если  $P$  — префикс  $Q$ , которое, в свою очередь, является префиксом  $R$ , или  $P$  и  $Q$  — различные префиксы  $R$ , действовать следует аналогично.

С. Нет, так не бывает:

$$P \oplus Q = P \cdot 10^n + Q > P + Q, \quad n \geq 1$$

## Задача 6. Мощения

Смотреть задачу 5 варианта 4 класса.

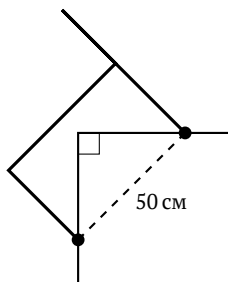
## Задачи 6 класса

### Задача 1. Клиренсы

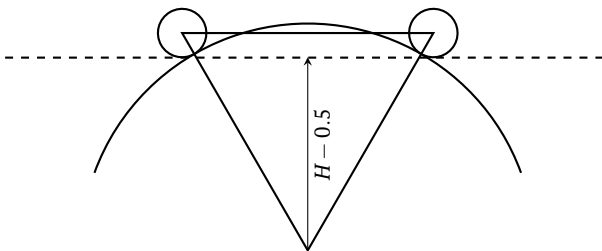
А.

$$740/2 - 175 = 195 \text{ (мм)}.$$

- В.** Угол дома «поднимается» над линией, соединяющей основания ножек стула, на расстояние, равное высоте прямоугольного треугольника с гипотенузой 50 сантиметров. Эта величина максимальна, очевидно, когда треугольник равнобедренный — тогда она равна 25 см. Поэтому расстояние от сиденья до земли должно быть не меньше 25 см.



- С.** Треугольник, образованный центром планеты и центрами колёс автобуса, — равносторонний со стороной 10.5 см: одна из сторон равна колёсной базе, а две других — сумме радиуса планеты (10 метров) и радиуса колеса (0.5 метра).



Дорожный просвет автобуса — расстояние от его пола (который должен касаться верхней точки планеты) до прямой, соединяющей нижние точки колёс. В нашем случае — это разность  $R - (H - 0.5)$ , где  $H$  — высота равностороннего треугольника, а 0.5 — радиус колеса.

$$H = 10.5 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$R - (H - 0.5) = 11 - 10.5 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

(это примерно 1.9 метра)

Это и есть ответ на задачу.

## Задача 2. Разрезания

Смотреть задачу 3 варианта 4 класса.

## Задача 3. Игры

Смотреть задачу 4 варианта 5 класса.

## Задача 4. Модельки

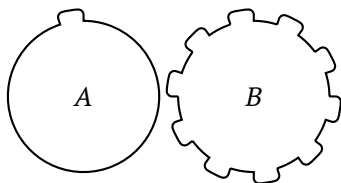
- А. Свойства подобных фигур говорят нам, что объём фигур, подобных с коэффициентом  $k$ , различается в  $k^3$  раз. Масса тела равна плотности вещества, умноженной на взятый его объём — поэтому она также должна уменьшаться в  $k^3$  раз при уменьшении тела в  $k$  раз.

В свою очередь,  $1200 / 43^3 = 0.015$ : 15 граммов — слишком маленький вес для модельки, но это вполне объяснимо: сделана она всё-таки грубее, чем оригинальная машина, и металл в ней сравнительно более толстый.

- В. Мы хотели бы отметить, что длина меридиана, 40 000 километров, это **вся окружность** Земли, а не её половина. То есть Парижский меридиан проходит через две долготы:  $2.33^\circ$  в. д. и  $177.67^\circ$  з. д..

Таким образом, самолёту нужно пролететь 40 000 км, затрачивая на километр 0.54 минуты.  $40000 \cdot 0.54 \div 60 = 360$  (часов).

- С. С одной стороны, если есть «классическая» плоская система из шестерёнок, то в ней передача вращения симметрична. С другой — можно с применением некоторой креативности придумать «несимметричную» систему. Например, такую, как на рисунке:



При вращении шестерёнки А она каждый оборот будет цепляться своим единственным зубом за шестерёнку В, и та будет вращаться. При вращении же шестерёнки В в текущем положении шестерёнок она не будет касаться А и передавать ей вращение.

## **Задача 5. Напрасно называют север крайним**

Смотреть задачу 2 варианта 4 класса.

## **Задача 6. Где-то я это уже видел**

Смотреть задачу 1 варианта 4 класса.

## **Задача 7. Ужасный гадкий аккуратный подсчёт**

Смотреть задачу 6 варианта 4 класса.

## **Задача 8. Фургончик**

- А.** Мы знаем, что  $(p_1 + 1)(p_2 + 1) = p_1 p_2 + 15$ . Если раскрыть скобки, получается  $p_1 + p_2 = 14$ . Единственные простые числа, подходящие под это условие, — 11 и 3. Это и есть ответ.
- В.** Для того, чтобы выяснить, какие ноги ещё не были переставлены, нам нужно отыскать все нечётные числа между 2 и 40, не делящиеся на 3. Это 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37. Проверить, что мы выписали все нужные числа, несложно — достаточно посмотреть на их остатки при делении на 6: числа должны иметь вид  $6k - 1$  или  $6k + 1$  (остальные остатки от деления на 6 либо чётные, либо 3). Получилось 12 чисел — это ответ на задачу.
- С.** Будем измерять расстояние, которое проехал Саша за день, не в километрах, а в метрах. Понятно, что расстояние между А и Г равно сумме со знаками + или – расстояний между городами, которые указаны в задаче. Осталось только заметить, что все расстояния в метрах (12000, 18000, 10500, 19500, ...) делятся на 3, а их предполагаемая сумма — 41000 — почему-то нет. Значит, в атласе дана неверная информация.

## **Задачи 7 класса**

### **Задача 1. Современная мебельная фабрика**

Смотреть задачу 3 варианта 5 класса.

## Задача 2. Прогрессивное сложение

А.  $95500 > 50095$ .

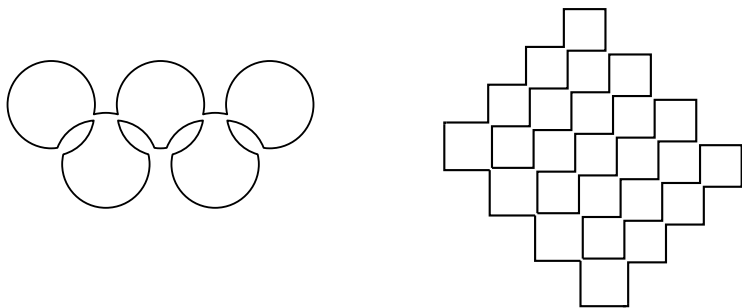
В. Если ни одно из трёх чисел  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  не является префиксом другого, то всё просто: надо отсортировать числа лексикографически и сложить в порядке «от большего к меньшему». Если одно из чисел — префикс другого (например,  $P$  — префикс  $Q$ ), то всё не так однозначно: надо сравнить их общую первую цифру и первую цифру  $Q$ , следующую за вхождением  $P$  в  $Q$ . Если второе больше, то надо ставить  $Q$  перед  $P$ , иначе —  $P$  перед  $Q$ .

Если  $P$  — префикс  $Q$ , которое, в свою очередь, является префиксом  $R$ , или  $P$  и  $Q$  — различные префиксы  $R$ , действовать следует аналогично.

С. Подойдут, например, числа  $a = 5$ ,  $b = 9$ :  $9 \oplus c$  — это как минимум двузначное число, которое не может быть равно пяти.

## Задача 3. На салфетке

А. Смотреть рисунок:



В. Обозначим количество узлов у треугольника Серпинского степени  $n$  через  $T(n)$ .

У треугольника степени 1 — три узла,  $T(1) = 3$ . Треугольник степени  $k + 1$  получается из трёх треугольников степени  $k$  поставкой их друг на друга — при этом три пары узлов (посередине сторон нового треугольника) склеиваются в просто три узла. Таким образом,

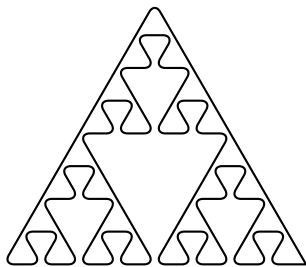
$$\begin{aligned}
 T(k) &= 3T(k-1) - 3 = \\
 &= 3(3T(k-2) - 3) - 3 = \dots = \\
 &= 3^{k-1} \cdot T(1) - 3^{k-1} - 3^{k-2} - \dots - 3 = \\
 &= 3^k - 3^{k-1} - 3^{k-2} - \dots - 3 = \\
 &= 3^k - \frac{3^k - 1}{3 - 1} = \frac{3^k + 1}{2}.
 \end{aligned}$$

Посчитать количество отрезков в наклонном квадрате и того прощ: они образуют  $2n$  «лесенок», в каждой из которых по  $2n$  отрезков. Поэтому ответом будет число  $4n^2$ .

- С. Научиться рисовать треугольник Серпинского, не отрывая пера от бумаги, можно последовательно: сначала первую степень, потом вторую, потом третью...

Будем делать так: сначала будем, начиная с нижней стороны треугольника, рисовать все его «внутренности», а потом «замкнём» получающуюся картинку двумя верхними сторонами. При этом «внутренности» треугольника степени  $n + 1$  — это трижды «внутренности» треугольника степени  $n$ .

Таким образом получится изображение треугольника степени 4:



а также любой другой степени, по аналогии.

## Задача 4. Не модельная, а модальная!

Пусть есть событие  $X$ , которое может происходить или не происходить в зависимости от того, какой сегодня день. Например, событие  $X$  = «сегодня суббота» случается раз в семь дней, а событие «сегодня я смотрел на часы» — каждый день.

- А. Фраза  $\Box\forall X$  означает дословно следующее: для каждого дня, начиная с сегодняшнего, в какой-то момент после него случится событие  $X$ . То есть, из какого дня вперёд ни посмотри — там, в будущем, обязательно хотя бы единожды случится событие  $X$ . На самом деле эта фраза эквивалентна следующей: «в бесконечное количество дней после сегодняшнего произойдёт событие  $X$ ».

Очевидно, что  $\Box\forall$  сегодня суббота — верно: после любого дня когда-то в будущем обязательно наступит суббота.

- В. Докажем, что из первой фразы следует вторая. Действительно: первая утверждает, что  $\forall\Box X$  верно для любого дня, начиная с сегодняшнего — в том числе и для сегодняшнего.

Теперь докажем, что из второй фразы следует первая. Вторая фраза означает: начиная с какого-то дня в будущем (назовём его  $D$ ) каждый день будет происходить событие  $X$ . Зная это, нам нужно доказать  $\Box\forall\Box X$ : для каждого дня  $d$  указать такой день после него, начиная с которого  $X$  выполняется каждый день.

Так вот если  $d$  раньше  $D$ , то  $D$  подойдёт в качестве искомого дня. Если же  $D$  раньше  $d$ , то после самого  $d$  событие  $X$  выполняется каждый день — возьмём  $d$  в качестве искомого дня.

- С. Легко убедиться, что  $\Box X$ ,  $\forall X$ ,  $\Box\forall X$  и  $\forall\Box X$  — попарно неэквивалентные фразы. Пусть  $X_1$  — «сегодня не 1 января 2000 года»,  $X_2$  — «сегодня у Пети Иванова последний звонок в школе»,  $X_3$  — «сегодня День рождения Пети Иванова»,  $X_4$  — «Пете Иванову уже исполнилось 18 лет»; достаточно проверить, что все  $X_i$  делают верными разные наборы утверждений.

Теперь докажем, что любая фраза с более длинной приставкой из  $\Box$  и  $\forall$  эквивалентна одной из приведённых ранее. Понятно, что  $\Box\Box$  и  $\forall\forall$  в любом месте приставки можно заменить на соответственно  $\Box$  и  $\forall$  без изменения смысла фразы. Значит, мы можем рассматривать только фразы, в приставке которых идёт не более одного квадрата / треугольничка подряд.

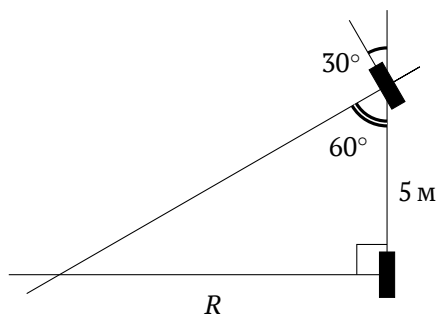
Согласно пункту В,  $\Box\forall\Box$  можно заменить на  $\forall\Box$  без изменения смысла фразы. Аналогично,  $\forall\Box\forall$  можно заменить на  $\Box\forall$ . Поэтому любую приставку мы можем сократить до содержащей не более двух символов — а все такие мы уже перечислили.



## Задача 5. Без пробуксовки

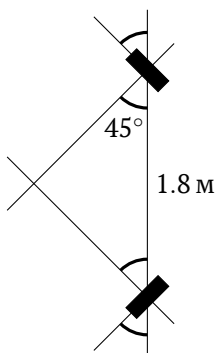
А. Машина едет по окружности вокруг точки, где пересекаются линии, перпендикулярные переднему и заднему колёсам, проходящие через их центр. Эти линии вместе с отрезком между колёсами машины образуют прямоугольный треугольник (см. рисунок), один из углов которого —  $60^\circ$ , а один из катетов — 5 м.

Тогда  $R = 5\sqrt{3}$  (отношения сторон прямоугольного треугольника с углом  $60^\circ$  — известные величины).

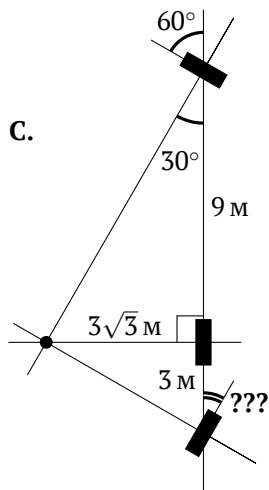


В. Теперь нас интересует высота прямоугольного равнобедренного треугольника с основанием 1.8 м. Она равна 0.9 м. То есть, погрузчик едет вокруг точки, расположенной на 0.9 м левее, чем середина его левого борта.

В.



С.



С. Аналогично первому пункту данной задачи, найдём расстояние от не поворачивающегося колеса до точки, вокруг которой едет ав-

тобус. Оно равно  $\frac{9}{\sqrt{3}} = 3\sqrt{3}$ : опять же, мы, зная один из катетов прямоугольного треугольника с углом  $60^\circ$ , ищем другой.

Теперь заметим, что среднее и заднее колёса, а также точка, вокруг ездит автобус, образуют прямоугольный треугольник с катетами 3 и  $3\sqrt{3}$  метра. Значит, его углы — 30 и 60 градусов. Отсюда заднее колесо нужно повернуть на 30 градусов.

## Задача 6. Как провожают транспортёры...

- А.** Если наблюдатель движется со скоростью  $\frac{1}{3}v$  навстречу транспортёру, собственная скорость которого равна  $\frac{1}{6}v$ , их скорость сближения равна  $\frac{1}{2}v$  — то есть, для наблюдателя этот транспортёр выглядит всего лишь в два раза медленнее, чем исходный.

В такой ситуации взрослый питон проехал бы мимо наблюдателя за 28 секунд. Но питон-детёныш короче, и для его проезда понадобится  $28 \cdot \frac{3}{4} = 21$  секунда.

- В.** Чтобы не обманываться длинами кубиков (как это сделало большинство участников олимпиады), мы на время заменим их на передние их точки относительно движения транспортёра. Расстояние между этими точками будет равно 15 сантиметров.

При попадании на более быстрый транспортёр расстояние между этими точками увеличится вдвое и составит 30 см. Чтобы получить расстояние между кубиками, из этой величины надо вычесть 5 сантиметров — получится 25 см.

Распространённая ошибка заключалась в том, что участники олимпиады умножали на 2 расстояние между концом первого кубика и началом второго. Это неправомерно, потому что две названные точки играют разную роль, и умножать расстояние между ними на 2 при решении задачи — это как мерить половину прыгунов в длину по дальней точке касания, а половину — по ближней.

- С.** Очевидно, что оптимальное деление песка между транспортёрами происходит тогда, когда они заканчивают работу одновременно: иначе у опустевшего транспортёра остаётся ресурс, когда он простаивает, а второй транспортёр работает вместо двоих.

Поэтому песок нужно поделить в отношении 2 : 1, отдав в два раза больше в два раза более быстрому транспортёру. Получится 400 кг первому и 800 кг второму.

## Задача 7. Одновременное вычитание

**А.** Возьмём пять чисел: 0, 0, 0, 0, 6. Очевидно, для них мы не можем добиться того, чего просят в задаче, потому что по факту можем уменьшать только одно число.

**В.** *Примечание автора:* эта задача на самом деле о том, что первая группа гомологий плоскости равна  $\{0\}$ . :)

Рассмотрим точку с весом, наибольшим по модулю. Не умаляя общности предположим, что её вес положителен. Так как сумма весов всех точек равна нулю, найдутся какие-то точки с отрицательным весом, суммарный вес которых «перевести» нашу по модулю. Соединим выбранную точку с найденными с помощью кривых так, чтобы (а) вес выбранной точки обратился после этого в ноль (б) модули весов найденных точек не увеличились.

Таким образом, (а) модули весов всех точек не увеличились (б) количество точек с нулевым весом увеличилось хотя бы на одну. На каждом шаге, при повторении процедуры, описанной в предыдущем абзаце, эти полуинварианты будут сохраняться — поэтому мы добьёмся ситуации, когда вес всех точек окажется нулевым (сумма весов всех точек сохраняется на каждом шаге).

**С.** Возьмём дорогу с наименьшим весом и пустим по ней машину, на номере которой написан вес этой дороги. Когда машина въедет в какой-то город, она сможет из него выехать: её номер равен наименьшему среди всех весов дорог, а сумма входящих в город равна сумме исходящих — поэтому из города выходит дорога весом не меньше, чем число на номере машины.

Так машина будет ездить по городам, пока не окажется в городе, в котором она уже побывала. Тогда возьмём все дороги, по которым машина ездила между двумя посещениями этого города, и вычтем из их веса число на номере машины — и заставим машину ездить по кругу через эти города. При этом сумма весов всех дорог строго уменьшится.

Опять возьмём дорогу, вес которой на этот раз наименьший среди всех, и повторим описанную процедуру. Пока наименьший среди всех весов дорог не равен нулю (то есть, пока есть дороги с положительным весом), будем повторять эту процедуру. Очевидно, в итоге оставшиеся веса всех дорог обратятся в ноль.

## Задача 8. Сетки на плоскости

**А.** Заметим, что рёбра на пути можно менять местами без изменения начала, конца и длины пути. Заметим также, что по рёбрам каждого из трёх направлений в сетке кратчайший путь ходит максимум в одну сторону, потому что иначе «подвинем» противоположно направленные проходы друг к другу и сократим их, укоротив путь.

Пусть путь использовал все три сорта рёбер в сетке. Тогда мы переставим его рёбра так, что сначала он будет идти в одну сторону по рёбрам первого сорта, затем по рёбрам второго, затем по рёбрам третьего.

Теперь возьмём треугольник и проставим на его сторонах те направления, в которых мы ходим по рёбрам соответствующей ориентации. Получилось три вектора — заметим теперь, что один из них равен сумме других!

Если кратчайший путь действительно использовал все три ориентации рёбер, то можно переставить рёбра в этом пути так, чтобы проход по двум подряд идущим рёбрам превратить в проход по одному. То есть, на такой уж путь и кратчайший.

**В.** Окуню достаточно перегрызть три узла около угла сетки.

**С.** Сумма углов четырёхугольника равна  $360^\circ$ . Искомое замощение плоскости получится, если складывать четырёхугольники так, чтобы в одной вершине сходились четыре угла соседних четырёхугольников, и чтобы два соседних четырёхугольника всегда соприкасались по соответственной стороне соответственными вершинами.

## Задача 9. Ужасный гадкий аккуратный подсчёт

**А.** Всего раскрасок  $n!$  — в «первом» секторе может стоять  $n$  цветов, в следующем —  $n - 1$ , и так далее. Из одной раскраски вращением круга можно получить ровно  $n$  раскрасок (включая её саму) — поэтому ответ равен  $\frac{n!}{n} = (n - 1)!$ .

**В.** В верхней полосе может стоять один из шести имеющихся цветов. Во второй полосе — любой из шести цветов, кроме уже стоящего в первой. В нижней полосе — любой из цветов, кроме уже стоящего во второй. Таким образом, ответ —  $6 \cdot 5 \cdot 5 = 150$ .

- С. Эта задача чуть сложнее пункта А: нужно поделить  $6!$  на число вращений куба. Сколько же их?

Возьмём «верхнюю» грань куба. При вращении она может оказаться на месте одной из шести граней (включая себя). Теперь посмотрим на одну из граней, соседних с ней. При вращении та может перейти в одну из четырёх граней, соседних с той, на месте которой оказалась верхняя. Заметим, что положение этих двух граней (для которого есть ровно 24 варианта) однозначно определяет положение всех остальных. Поэтому ответ на задачу —  $\frac{6!}{24} = 30$ .

## Задача 10. Средние арифметические

- А. Придумайте четыре набора по пять чисел каждый так, чтобы максимум средних арифметических этих наборов был больше, чем среднее арифметическое наибольших чисел этих наборов.

1, 2, 3, 4, 5; 1, 2, 3, 4, 5; 1, 2, 3, 4, 5; 10001, 10002, 10003, 10004, 10005.

Максимум средних равен 10003, а среднее арифметическое максимумов — 255.

- В. После разбиения детей на классы у нас будет четыре «самых низких» ребёнка, по одному на класс. Расставим их по росту. Одним из них точно будет тот, чей рост — 101 сантиметр. Рост второго будет не больше 131, третьего — не больше 161, четвёртого — не больше 191, потому что между этими отметками вмещается ровно по тридцать детей, и если не все они будут в одном классе, то более высокий самый низкий ребёнок окажется среди них.

Таким образом, у нас есть оценка сверху на величину, которую мы пытаемся максимизировать —  $\frac{1}{4}(101 + 131 + 161 + 191)$ . Попробуем добиться того, чтобы среднее арифметическое четырёх ростов было именно таким. Для этого можно разбить детей на классы «подряд» — первые тридцать в первый класс, вторые тридцать — во второй, ...

Так и сделаем.

- С. Заметим, что какое разбиение детей на классы ни возьми, — сумма средних арифметических ростов детей в классах будет постоянной (и равна 362 см). Значит, минимум наибольший, когда все средние арифметические совпадают. Значит, нужно составлять классы,

симметричные относительно 90,5. Например, в первый класс отправить первые десять детей и последние десять, а во второй — вторую и предпоследнюю десятки детей.

## Задачи 8 класса

### Задача 1. У магазина

**А.** Понятно, что Фёдор и Кирилл увеличивают все числа в одинаковое число раз. И „144“, названное Фёдором, есть квадрат этого числа (так как он назвал то, во сколько раз увеличивает всё Кирилл, сам увеличив это число). Тогда оба продавца умножают всё на 12.

Соответственно, учебник стоит  $43200 \div 144 = 300$  рублей — так как его цена прошла через уста, опять же, обоих продавцов.

**В.** Делимость на 99 значит делимость на 9 и на 11. Восстановить стёртую цифру можно почти однозначно, посчитав сумму оставшихся цифр и найдя остаток от деления её на 9. Проблема может возникнуть, если сумма оставшихся на номере цифр делится на 9 — тогда непонятно, 0 нам ставить на пустое место или 9.

Признак делимости на 11 говорит нам, что знакопеременная сумма цифр числа должна делиться на 11. Заметим, что при постановке цифр 9 и 0 на одно и то же место не может оказаться так, что оба результата будут делиться на 11. Поэтому получится однозначный ответ.

**С.** То, как происходит торг между продавцом и покупателем, на самом деле, повторяет работу алгоритма Евклида. Алгоритм Евклида всегда завершается — значит и торг завершится.

При этом на каждом шаге торга хотя бы одна из названных цен уменьшается хотя бы на 1, поэтому в любой момент времени количество шагов торга оценивается сверху суммой цен, называемых покупателем и продавцом. Поэтому количество шагов всегда будет строго меньше суммы текущих чисел.

Пусть изначально названы цены  $a$  и  $b = a + t$ . Тогда на следующем шаге торга будут названы цены  $a$  и  $t$ . Тогда количество шагов торга строго меньше, чем

$$a + \underset{\substack{\text{один шаг} \\ \text{уже сделан}}}{t + 1} = b + 1 \leq 21.$$

Торг с 20 шагами легко придумать: пусть изначально были названы цены 1 и 20.

## Задача 2. Ужасный гадкий аккуратный подсчёт

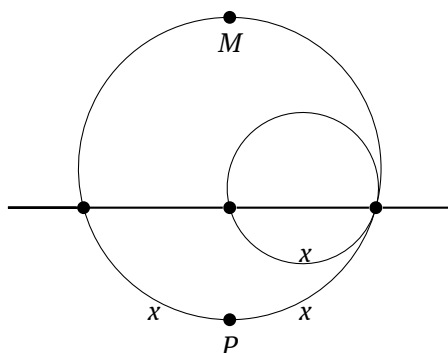
Смотреть задачу 9 варианта 7 класса.

## Задача 3. Не модельная, а модальная!

Смотреть задачу 4 варианта 7 класса.

## Задача 4. Катим круг

- А. «Расправим» большую окружность — заметим, что дуга, составляющая её половину, равна по длине окружности круга, который мы катим. Это значит, что, проехав эту дугу, круг снова коснётся её отмеченной точкой.



- В. Длина дуги круга между точкой его касания с окружностью и отмеченной точкой равна длине дуги окружности между точкой её касания с кругом и точкой  $P$ . Обозначим эту длину через  $x$ . Отложим дугу длиной  $x$  налево от точки  $P$  (смотреть рисунок). Отрезок, соединяющий точку касания круга с окружностью и конец новой дуги, будет горизонтальным.

При этом дуга длины  $x$  на круге получается из дуги длины  $x$  на окружности гомотетией с коэффициентом  $\frac{1}{2}$  и центром в точке касания

круга с окружностью: эти дуги отложены из одной точки на окружностях, радиусы которых отличаются в два раза.

Горизонтальный отрезок переходит при гомотетии в горизонтальный отрезок — поэтому концы дуги на квадрате также лежат на одной горизонтальной прямой.

- С. В силу того же факта, что дуга на квадрате получается из дуги на окружности гомотетией с коэффициентом  $\frac{1}{2}$ , её конец будет находиться ровно посередине между концами большой дуги — то есть, ровно над точкой  $P$ , потому как большая дуга изначально строилась симметричной.

## Задача 5. Средние арифметические

Смотреть задачу 10 варианта 7 класса.

## Задача 6. Игры

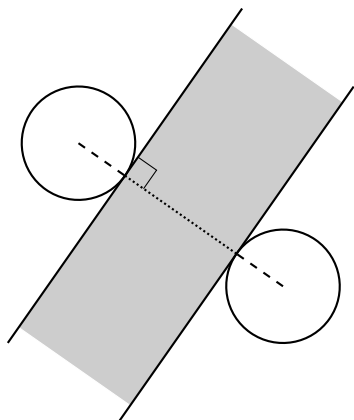
Смотреть задачу 4 варианта 5 класса.

## Задача 7. Об одной задаче классификации

- А. Очевидно, что ширина этой полосы не может быть больше, чем расстояние между самыми близкими друг к другу точками кругов. Сделаем ширину полосы равной этому расстоянию.

Для этого соединим центры кругов отрезком и построим касательные к кругам в точках пересечения отрезка с их границей. Они будут параллельны и образуют полосу максимально допустимой ширины (смотреть рисунок).





**В.–С.** Сработает похожий метод: надо найти ближайшие друг к другу точки квадратов и соединить их отрезком — искомая полоса получится, если провести к данному отрезку перпендикуляры в его концах.

С одной стороны, её ширина будет максимально допустимой, потому что она будет равна расстоянию между ближайшими точками квадратов, а большая ширина запрещена.

С другой стороны, ни одна точка из квадратов не попадёт внутрь этой полосы, потому что квадрат — выпуклый многоугольник. В силу этого он либо лежит по одну сторону от прямой, проходящей через точку его границы, либо лежит по обе стороны, и с каждой из сторон от прямой находится часть стороны, на которой лежала точка, через которую мы проводили прямую.

Но тогда на части этой стороны, лежащей внутри полосы, найдётся точка, которая ближе к другому концу отрезка, лежащем на другом краю полосы, что противоречит построению полосы.

## Задача 8. Одновременное вычитание

Смотреть задачу 7 варианта 7 класса.

## Задача 9. На салфетке

Смотреть задачу 3 варианта 7 класса.

## Задача 10. Необходимости и достаточности

А. Скорость мышки равна  $10 \cdot 35 = 350$  см/с, а скорость кошки —  $55 \cdot 9 = 495$  см/с. Несомненно, кошка быстрее.

В. Сколько вылетов нужно сделать винтовому самолёту? Каждого Йожина надо осыпать трижды — получается 300 осыпаний. Каждый вылет даёт два осыпания — поэтому нужно 150.

А реактивному? Аналогичным образом получаем  $100 \cdot 8 \div 5 = 160$  вылетов. Таким образом, винтовой самолёт на 10 вылетов эффективнее.

С. Обозначим через  $x_k$  массу еды, которая была в наличии у велосипедистов *перед*  $k$ -ым обедом. Мы знаем, что  $x_{31} = 0$ , и ищем  $x_1$ . Давайте выразим  $x_k$  через  $x_{k+1}$ . В соответствии с условием задачи,

$$x_k = \underbrace{0.1 \cdot x_k + 2}_{\text{съедают за } k\text{-ым обедом}} + x_{k+1}.$$

Откуда

$$x_k = \frac{20}{9} + \frac{10}{9}x_{k+1};$$

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{20}{9} + \frac{10}{9} \cdot \frac{20}{9} + \left(\frac{10}{9}\right)^2 \cdot x_3 = \\ &= \frac{20}{9} + \frac{10}{9} \cdot \frac{20}{9} + \dots + \left(\frac{10}{9}\right)^{28} \cdot \frac{20}{9} = \\ &= \frac{20}{9} \cdot \frac{\left(\frac{10}{9}\right)^{29} - 1}{\frac{10}{9} - 1} - \text{это ответ на задачу.} \end{aligned}$$

## Задача 11. Рукопожатия

Смотреть задачу 2 варианта 5 класса.

## Задача 12. Прогрессивное сложение

Смотреть задачу 2 варианта 7 класса.

# Задачи профильного варианта 7 класса

## Задача 1. Римская десятичная система счисления

1.

$$333_p = 333_d$$

$$2050_p = 2000 + 0 - 50 = 1950_d$$

$$10001_p = 9999_d$$

$$404004_p = 400000 - 4000 + 4 = 396004_d$$

2. Интересная особенность римской десятичной системы счисления заключается в том, что для умножения натурального числа на  $-1$  перед ним достаточно приписать цифру 0: так как она меньше любой значащей цифры, нам придётся вычесть число, получаемое из младших разрядов, из  $0 \cdot 10^m = 0$ .

$$91_d = 91_p$$

$$150_d = 1850_p$$

$$-1_d = 01_p$$

$$13_d = 27_p$$

3. Ответ очевиден: подходят все строки, цифры в которых расположены в порядке убывания.

Почему так? Если цифры в строке расположены не по убыванию, то при чтении её слева направо в какой-то момент нам придётся сделать вычитание при расшифровке римской записи против сложения при расшифровке десятичной. И результат получится строго меньше.

4. У каких чисел их римская запись может совпадать со стандартной? У тех, у которых старшая цифра не меньше младшей. Для остальных чисел нам придётся придумывать более хитрую процедуру преобразования.

Пусть дано число  $xу_{\text{Д}}$ ,  $x < у$ . Давайте вычтем его из 100:

$$\begin{array}{r} 1 \qquad \qquad 0 \qquad \qquad 0 \\ \qquad \qquad x \qquad \qquad y \\ \hline (10 - x - 1) \quad (10 - y) \end{array}$$

Получилось двузначное число, состоящее из цифр  $10 - x - 1$  и  $10 - y$ . Будет ли оно «правильным», то есть, окажется ли его первая цифра не меньше второй?

$$\begin{aligned} 10 - x - 1 &\geq 10 - y \\ -x - 1 &\geq 10 - y \\ x + 1 &\leq y \\ x &< y \end{aligned}$$

То есть, первая цифра полученного числа **всегда** будет не меньше второй, и при переводе из римской записи в стандартную такое число будет давать себя же. Более того, его первая цифра — хотя бы 1, то есть, не меньше единицы. Отсюда

$$\begin{aligned} 1[10 - x - 1][10 - y]_{\text{Р}} &= 100 - ([10 - x - 1][10 - y]_{\text{Р}}) = \\ &= 100 - ([10 - x - 1][10 - y]_{\text{Д}}) = xу_{\text{Д}}. \end{aligned}$$

Мы получили *алгоритм*, то есть процедуру (не включающую в себя перебор) построения по десятичному числу его римской записи:

- а) Сравнить первую цифру и вторую;
- б) Если первая оказалась не меньше, то оставить запись как есть; если первая оказалась меньше, то вычесть число из 100 — запись вида двузначная разность будет ответом.

Стоит отметить, что получаемая нами таким образом римская запись будет одной из многих, соответствующих данному числу.

5. Для умножения числа на 10 к его записи нужно приписать ноль справа, а для умножения на  $-1$  — слева, это уже обсуждалось ранее.
6.  $91_{\text{Р}} = 109_{\text{Р}} = 91$ .
7.  $1999_{\text{Р}} = 199_{\text{Р}} = 19_{\text{Р}} = 1_{\text{Р}}$ .

8. Придумайте признаки делимости на 2, на 5, на 3 в десятичной римской системе счисления.

Признаки делимости на 2 и на 5 всё так же будут завязаны на последней цифре, потому как при «расшифровке» всех более старших разрядов они прибавляются и вычитаются, только будучи домножены на какую-то степень десятки, а 10 делится на 2 и на 5.

9. Неравенство  $\frac{Y_D}{5} < N \leq Y_D$ , будучи, вообще говоря, **неверным** в десятичной системе счисления, оказывается верным в двоичной. Двоичная римская система счисления интересна ещё и тем, что там каждому числу соответствует не более двух римских записей (в отличие от десятичной системы, смотреть пункт 7).

Авторы задач олимпиады «Математика НОН-СТОП» рекомендуют двоичную римскую систему счисления как тему для исследовательских проектов, которые могут быть представлены на различных научных конкурсах для школьников.

10. Докажем, что  $M = 121$  — именно такое число.

- а) Если у него есть римская запись, то у него есть четырёхзначная римская запись. Причина этому в том, что любая запись большей значности обязана была бы начинаться с  $19x\dots$ ,  $x \neq 1$ , так как иначе при её расшифровке получится число, больше 121. Но такую запись можно заменить на  $1x\dots$  без изменения её расшифрованного значения.
- б) Четырёхзначная римская запись числа 121 должна начинаться на 18. Если первая цифра была бы 2, то при переводе получилось бы число не меньше 1000. Если вторая цифра была бы 7 (или меньше), то получилось бы число не меньше 200. А если бы вторая цифра была равна 9, то следующая за ней цифра не превосходила бы её и тоже «вычиталась» бы, поэтому результат не превосходил бы

$$1000 - 900 + 10 = 110.$$

- с) Последняя цифра римской записи числа 121 равна либо 1 (тогда она должна прибавляться), либо 9 (тогда она должна вычитаться). В первом случае  $1000 - 800 \pm x \cdot 10 + 1 = 121$ ; во втором случае  $1000 - 800 \pm x \cdot 10 - 9 = 121$ .

В обоих случаях на роль  $x$  претендуют цифры 7, 8 и 9. Тут уже перебором просто показать, что ни одна из них не подойдёт.

## Задача 2. Изображения на плоскости

Первый пункт задачи содержит простые технические утверждения, поэтому мы сразу начнём со второго.

2. Координаты  $x$  и  $y$  не могут одновременно быть по модулю меньше единицы, чтобы неравенство из условия было выполнено. Фигура, состоящая из точек, обе координаты которых по модулю меньше единицы, — это квадрат со стороной 2 и центром в начале координат, не включающий свою границу. Значит, искомое множество точек — дополнение этого квадрата (включая его границу).

3. Видно, что принадлежность точки множеству на первом рисунке зависит только от её второй координаты. Будем подбирать неравенство в виде  $P(y) \leq 0$ , где  $P$  — многочлен от одной переменной. Мы должны получить  $P(y) \leq 0$ , когда  $-1 \leq y \leq 1$ .

Принимая в рассмотрение первый пункт этой же задачи, можно понять, что  $(y + 1)(y - 1)$  — именно такой многочлен. Ответ:

а)  $(y + 1)(y - 1) \leq 0$ .

Легко понять, что нижняя наклонная прямая, ограничивающая фигуру на втором рисунке, задаётся уравнением  $y - x + 1 = 0$ ; верхняя же прямая — уравнением  $y - x - 1 = 0$ . Между этими прямыми находится множество точек, для которых выражения  $y - x + 1$  и  $y - x - 1$  имеют разный знак: первое уже «успело» стать положительным, а второе ещё нет. Такое множество задаётся неравенством:

б)  $(y - x + 1)(y - x - 1) \leq 0$ .

4. Неравенство для крестика удобно искать в виде  $P(x) \cdot Q(y) \leq 0$ , где  $P(x) \leq 0$  — неравенство, задающее вертикальную полосу, а  $Q(y) \leq 0$  — горизонтальную полосу. Тогда в пересечении полос  $P(x) \cdot Q(y)$  будет больше нуля, что исключит это пересечение из получаемой фигуры.

Как задавать полосу от  $-1$  до  $1$ , мы знаем, поэтому сразу получаем ответ:

а)  $(x + 1)(x - 1) \cdot (y + 1)(y - 1) \leq 0$ .

Для решения второго подпункта вспомним, что такое круг: это множество точек, расстояние от которых до выбранной меньше радиуса. Иными словами,

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - R^2 \leq 0.$$

В нашем случае  $x_0 = y_0 = 0$ ,  $R = 1$ . Верхняя полуплоскость, в свою очередь, задаётся уравнением  $x - y \leq 0$ . Наша фигура тогда — множество точек, где ровно одно из двух выражений, указанных выше, не превосходит нуля. Ответ —

$$\text{б) } (x - y)(x^2 + y^2 - 1) \leq 0.$$

5. Мы уже знаем, каким неравенством задаются круги. Закрашенная фигура на рисунке — множество точек, где выполнено нечётное количество (1 или 3) неравенств, задающих круги. Значит, ответ:

$$\begin{aligned} & \left( (x - 1)^2 + (y + 1)^2 - 2.25 \right) \cdot \\ & \cdot \left( (x + 1)^2 + (y + 1)^2 - 2.25 \right) \cdot \\ & \cdot \left( x^2 + (y - 0.5)^2 - 2.25 \right) \leq 0. \end{aligned}$$

6. Окружность задаётся уравнением

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - R^2 = 0.$$

Фигура из трёх окружностей — это множество точек, для которых хотя бы одно из выражений, задающих окружность, обращается в ноль. Отсюда ответ:

а)

$$\begin{aligned} & (x^2 + y^2 - 4) \cdot \\ & \cdot \left( (x + 1)^2 + y^2 - 1 \right) \cdot \\ & \cdot \left( (x - 1)^2 + y^2 - 1 \right) = 0. \end{aligned}$$

Для фигуры из трёх лучей заметим, что два из них — горизонтальный и направленный вверх — образуют график функции  $y = 0.5|x| + 0.5x$ . Соответственно, горизонтальный и направленный вниз образуют график функции  $y = -0.5|x| - 0.5x$ . Нам достаточно, чтобы для

точки  $(x, y)$  было выполнено хотя бы одно из этих условий. Отсюда ответ —

$$\text{б) } (0.5|x| + 0.5x - y)(-0.5|x| - 0.5x - y) = 0.$$

7. При решении этого задания мы уже много раз пересекали и объединяли фигуры, поэтому ответ понятен без пояснений:

$$\text{а) } \max(|P_1(x, y)|, |P_2(x, y)|) = 0;$$

$$\text{б) } P_1(x, y) \cdot P_2(x, y) = 0.$$

$$8. \quad \text{а) } \max(P_1(x, y), P_2(x, y)) < 0;$$

$$\text{б) } \min(P_1(x, y), P_2(x, y)) < 0;$$

$$\text{в) } P_1(x, y) \cdot P_2(x, y) < 0.$$

### Задача 3. Простеющие числа

Перечислим вообще все простеющие числа. Вот они:

$$2, 3, 4, 6, 8, 12, 18, 24, 30.$$

2. Нечётное простеющее число не может быть больше 4 — так как тогда 4 взаимно просто с ним ( $4 = 2 \cdot 2$ ) и не является при этом простым числом.

3–4. Вообще, простеющее число, не делящееся на простое  $p$ , не может быть больше  $p^2$ , так как тогда составное  $p^2$  будет взаимно просто с ним. Поэтому простеющие числа, не делящиеся на 3, все не превосходят 9, а не делящиеся на 5 — не превосходят 25.

5–7. Числа  $N$  и  $N - 1$  всегда взаимно просты, поэтому если  $N$  простеющее,  $N - 1$  обязано быть простым (и никак не может быть квадратом простого).

В шестом же пункте  $n$  будет взаимно просто с  $p_1 \cdot p_2$  (так как оно взаимно просто с  $p_1$  и  $p_2$ ), которое также является составным числом.

8. Докажем, что не бывает простеющих чисел, больших 210. Для этого докажем, что число  $N > 210$  больше квадрата наименьшего простого числа, на которое оно не делится. Тогда оно окажется взаимно просто с этим квадратом, который является составным числом.

Пронумеруем простые числа по возрастанию:  $2 = p_1, 3 = p_2, \dots$ . Пусть  $p_k$  — наименьшее простое, такое что  $N$  не делится на  $p_k$ . Тогда  $N \geq p_1 \cdot \dots \cdot p_{k-1}$ .



В силу постулата Бертрана  $p_{k-1} \geq \frac{p_k}{2}$ , а  $p_{k-2} \geq \frac{p_{k-1}}{2} \geq \frac{p_k}{4}$ . Отсюда  $p_{k-2} \cdot p_{k-1} \geq \frac{p_k^2}{8}$ .

Если мы хотим, чтобы число  $N$  было простеющим, то оно должно быть меньше, чем  $p_k^2$ . То есть,  $p_1 \cdot \dots \cdot p_{k-3} \leq 8$ . Отсюда уж точно  $k - 3 \leq 2$ , то есть,  $k \leq 5$ . В свою очередь,  $N \leq 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 = 210$ .

Что и требовалось доказать.

## Задачи профильного варианта 8 класса

### Задача 1. Простеющие числа

Смотреть задачу 3 варианта 7 класса.

### Задача 2. Расстояние между множествами

1. Несложно убедиться в том, что  $\max \min$  равен 1 (вершина квадрата, ближайшая к данной, всегда находится на расстоянии 1 от неё). С другой стороны,  $\min \max$  равен  $\sqrt{2}$ : дальняя вершина от данной находится «по диагонали», на расстоянии  $\sqrt{2}$ .
2. То, что  $\max_{x \in A} F(x) \leq T$ , равносильно тому, что для всякого  $x_0 \in A$  выполнено  $F(x_0) \leq T$ . В нашем случае нужно доказать, что

$$\min_{y \in B} \text{dist}(x_0, y) \leq \min_{y \in B} \left( \max_{x \in A} \text{dist}(x, y) \right).$$

Это неравенство очевидно, поскольку в левой части мы максимизируем расстояние до *какой-то* точки из множества  $A$ , а в правой части — до *дальней* точки множества  $A$ .

3. Воспользуемся там, что уже было нами получено в первом пункте: для квадрата со стороной 1 разность указанных величин была равна  $\sqrt{2} - 1$ . Тогда для квадрата со стороной  $T$ , в силу свойств подобных фигур, эта разность будет равна  $(\sqrt{2} - 1) \cdot T$  — это число, изменяя  $T$ , можно сделать больше наперёд заданного  $r$ .
4. Например, подойдут следующие множества:  $B$  состоит из двух точек  $t_1, t_2$  на расстоянии 5 друг от друга, а  $A = \{t_1\}$ .

5. Рассмотрим точку  $c \in C$ . Так как  $C$  лежит в  $\rho_2$ -окрестности  $B$ , найдётся точка из  $b \in B$  такая, что  $\text{dist}(b, c) \leq \rho_2$ . Далее, так как  $B$  лежит в  $\rho_1$ -окрестности  $A$ , найдётся точка  $a \in A$ :  $\text{dist}(a, b) \leq \rho_1$ .

В силу неравенства треугольника,  $\text{dist}(a, c) \leq \rho_1 + \rho_2$ . Поэтому для (произвольной!) точки  $c$  нашёлся круг нужного радиуса с центром в точке из  $A$ , в котором она лежит. Что и требовалось.

6. Положим

$$F(x) := \min_{y \in A} \text{dist}(x, y), \quad x \in A.$$

Оказывается,  $F(x)$  всегда равно нулю:  $\text{dist}$  всегда не меньше нуля, а если взять  $y = x$  — получится как раз ноль, и минимум обратится в ноль. Теперь уж

$$\max_{x \in A} F(x) = \max_{x \in A} 0 = 0,$$

что и требовалось.

7. Фиксируем точку  $x_0 \in A$ . Мы знаем, что  $\min_{y \in B} \text{dist}(x_0, y) \leq R$  (так как максимум подобных величин по всем точкам из  $A$  не превосходит  $R$ . Тогда найдётся  $y_0 \in A$  такая, что  $\text{dist}(x_0, y_0) \leq R$ . Это значит, что  $x_0$  лежит в  $R$ -круге с центром в точке  $y_0$  — а, значит, в  $R$ -окрестности множества  $B$ .

Если же  $A$  целиком лежит в  $R$ -окрестности  $B$ , то для каждой точки из  $x_0 \in A$  найдётся точка  $y_0 \in B$  (центр круга, в который она попала), такая что  $\text{dist}(x_0, y_0) \leq R$ . Отсюда  $\min_{y \in B} \text{dist}(x_0, y) \leq R$ , и условие задачи выполнено.

8.

**d=0**: Если два множества совпадают, то DIST равен нулю: это доказано в пункте 6. Если множества не равны —  $A \neq B$  — то найдётся точка, скажем  $a \in A$ , которая не лежит в  $B$ . Для неё  $\min_{y \in B} \text{dist}(a, y) > 0$  — значит, и DIST, получаемый взятием максимума из этой величины и каких-то других величин, будет строго больше нуля.

**d(a,b) + ... :** Введём

$$\text{DIST}_1(A, B) := \max_{x \in A} \left( \min_{y \in B} \text{dist}(x, y) \right)$$

$$\text{DIST}_2(A, B) := \text{DIST}_1(B, A)$$

$$\text{DIST}(A, B) = \max(\text{DIST}_1(A, B), \text{DIST}_2(A, B))$$

Согласно пункту 7,  $\text{DIST}_1(A, B)$  — наибольший радиус окрестности множества  $B$ , в которой лежит множество  $A$ .

Тогда  $\text{DIST}_1(A, B) + \text{DIST}_1(B, C) \leq \text{DIST}_1(A, C)$  на основании пункта 5. То же самое верно для  $\text{DIST}_2$ . Теперь

$$\begin{aligned} \text{DIST}(A, B) + \text{DIST}(B, C) &= \\ &= \max(\text{DIST}_1(A, B), \text{DIST}_2(A, B)) + \\ &\quad + \max(\text{DIST}_1(B, C), \text{DIST}_2(B, C)) \geq \\ &\quad (\max(a, b) + \max(c, d) \geq \max(a + b, c + d)) \\ &\geq \max(\text{DIST}_1(A, B) + \text{DIST}_1(B, C), \\ &\quad \text{DIST}_2(A, B) + \text{DIST}_2(B, C)) \geq \\ &\geq \max(\text{DIST}_1(A, C), \text{DIST}_2(A, C)) = \text{DIST}(A, C). \end{aligned}$$

9. Если  $A$  и  $B$  — подмножества одного круга радиуса  $R$ , то расстояния между любыми двумя их точками вообще не превосходят  $2R$ . Как операции  $\max$  и  $\min$  к ним ни применяй, всегда будет получаться величина, не превосходящая  $2R$ .

### Задача 3. Изображения на плоскости

Смотреть задачу 2 варианта 7 класса.

# Задачи 2017 года

## Задачи 4 класса

### Задача 1. Обаятельный домовёнок

- А.  $6 - 4 = 2$ , отсюда Кузя догоняет издателей со скоростью 2 статьи в день. На то, чтобы нагнать 40 статей, у него уйдёт 20 дней.
- В. Площадь квадрата  $2 \times 2$  в 4 раза больше площади квадрата  $1 \times 1$ , поэтому на него уходит в 4 раза больше чернил. Значит, на том же картридже Кузя сможет напечатать  $10000 \div 4 = 2500$  квадратов  $2 \times 2$ .
- С. Среди гвоздиков почти каждого горизонтального ряда как минимум на двух должны быть сделаны повороты: ведь нитка входит и выходит из этого ряда. Однако найдутся два горизонтальных ряда гвоздиков, где нитка начинается или кончается — поэтому количество поворотов нитки может быть оценено сверху числом  $2 \cdot 5 + 2 = 12$ .

Протянуть нитку, сделав 12 поворотов, просто: можно, например, стартовать из верхней левой клетки и пойти до конца направо, потом, сделав два поворота, спуститься на ряд вниз и пойти налево — и так далее.

### Задача 2. Велопоход

А.

$$t = \frac{S}{v} = \frac{400 \text{ м}}{10 \text{ км/ч}} = \frac{0.4 \text{ км}}{10 \text{ км/ч}} = \frac{1}{25} \text{ ч.}$$

Это, в свою очередь, равно 2.4 минутам.

- В. Остановки занимают половину времени Дмитрия Григорьевича, поэтому его средняя скорость будет в два раза меньше его скорости в движении — и равна 17 км/ч. Это, тем не менее, выше средней скорости Полины, которая равна 15 км/ч. Поэтому Д. Г. быстрее

- С. Подъём в горку и спуск с неё имеют одинаковую длину. Степан на гоночном велосипеде въезжает в горку со скоростью 10 км/ч, а спускается со скоростью 40 км/ч. А Пётр на тракторе едет с постоянной скоростью 17 км/ч. Кто из них быстрее преодолеет подъём и спуск? Пусть длина подъёма в горку равна  $x$  километров. Тогда время, за которое Степан преодолеет подъём и спуск, в часах равно

$$\frac{x}{10} + \frac{x}{40} = \frac{5x}{40} = \frac{x}{8}.$$

Время же, которое потратит Пётр, равно  $\frac{2x}{17}$  — и нам нужно сравнить эти два числа. Посмотрим на их отношение:

$$\frac{x \cdot 17}{8 \cdot 2x} = \frac{17}{16} > 1.$$

То есть, Пётр всё-таки будет ехать дольше.

### Задача 3. Буквы на белом листе

А.

Б $\longrightarrow$ В	Е $\longrightarrow$ В	О $\longrightarrow$ Ю	Ш $\longrightarrow$ Щ
Г $\longrightarrow$ Б	И $\longrightarrow$ Й	Р $\longrightarrow$ В	Ь $\longrightarrow$ Б
Г $\longrightarrow$ П	К $\longrightarrow$ Ж	С $\longrightarrow$ О	Ь $\longrightarrow$ Ы
Г $\longrightarrow$ Т	Л $\longrightarrow$ Д	Ц $\longrightarrow$ Щ	Ь $\longrightarrow$ Ъ

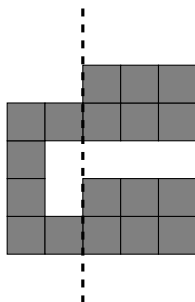
Остальные буквы (в их «типографском» начертании) ни во что превратить нельзя. Однако эта задача оставляет большую свободу трактовок, поэтому оценивалась в пользу участника.

- В. Если лист бесконечный, то это буквы 'В' и 'Ф', имеющие в своём составе два «кольца». Если же мы рассматриваем обычный лист бумаги А4, то на нём можно написать букву 'Ж', распространив её до краёв листа — и она поделит его на 6 областей.
- С. От двух областей (когда они написаны одна поверх другой) — до 9, когда они пересекаются в двух точках и касаются краёв листа.

### Задача 4. Делить и резать, резать и делить

- А. Нужно провести две диагонали — четыре треугольника, на которые они поделят прямоугольник, будут иметь равную площадь.

**В.** Смотреть рисунок:



**С.** Проведём в круге два диаметра под углом  $45^\circ$ . Каждый из них поделит круг на две равных части, однако вдвоём они делят круг на 4 части, площади которых равны  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{3}{8}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{3}{8}$  площади круга.

## Задача 5. О, как мы далеки!

**А.** Не умаляя общности, пусть остановка  $A$  находится левее  $D$ . Тогда остановка  $C$  — либо слева от  $A$ , либо справа от  $D$ .

Если остановка  $C$  слева от  $A$ , то она находится на расстоянии 4 от неё. Но тогда нам некуда поставить  $B$  так чтобы  $AB = 4$ ,  $BC = 2$ . Отсюда  $C$  находится справа, и  $AC = 6$ .

**В.** Вдоль прямой аллеи растут четыре дерева. Расстояния между соседними равны 63, 14 и 84 метра соответственно. Сколько деревьев надо ещё посадить, чтобы расстояние между любыми двумя соседними деревьями было одинаковым?

Сажая новое дерево, мы бьём промежуток между прежде соседними деревьями на два меньших промежутка. Если мы добились того, что расстояние между соседними деревьями стало равным  $d$ , то  $d$  является делителем 63, 84 и 14.

$\text{НОД}(63, 84, 14) = 7$ , поэтому деревья можно посадить каждые 7 метров (и большего расстояния между соседними добиться нельзя). Отсюда ответ —

$$(63/7 - 1) + (84/7 - 1) + (14/7 - 1) = 20 \text{ деревьев.}$$

**С.** Да, точки можно расставить:

$$A \xleftarrow{3} D \xleftarrow{3} B \xleftarrow{6} E \xleftarrow{1} C.$$

## Задача 6. Быть врачом — весьма ответственно!

**А–В.** Здесь должна быть картинка

**С.** Да, стратегия для докторов будет следующая: Айболит надевает первую пару перчаток, а на неё сверху вторую; Пеппер оперирует только во второй паре перчаток (её внешняя сторона касалась только пациента, а внутренняя чистая. Наконец, Ватсон делает операцию, надев на себя вывернутую первую пару перчаток (её новая внутренняя сторона — ещё чистая), а сверху на неё — вторую.

Внешняя сторона второй пары перчаток по-прежнему касалась только пациента, а то, что между и второй парой перчаток соприкасаются уже грязные стороны, нас не волнует.

## Задачи 5 класса

### Задача 1. Поделим – посмотрим

**А.** Первые два треугольника, пересекаясь, образуют 6 областей: внешность, два «края» каждого из треугольников и их пересечение. Заметим теперь, что для замкнутой линии количество областей, которые она добавляет к картинке, равно количеству её пересечений с другими, уже имеющимися, линиями. Третий треугольник пересечёт не более восьми линий — он может максимум дважды «входить» и «выходить» из имеющихся двух треугольников. Четвёртый треугольник добавит максимум 12 областей, по тем же причинам.

Таким образом, ответ —  $6 + 8 + 12 = 26$  областей, пример легко построить.

**В.** Прямая может «входить» в семиугольник и «выходить» из него. При этом изначально она находится снаружи и в конце должна оказаться там же. Каждую сторону семиугольника прямая пересекает не более одного раза, а количество пересечений должно быть чётным. Значит, прямая пересекает максимум шесть сторон, «проходя» через семиугольник трижды.

Получается, она делит семиугольник на максимум на четыре части: до первого пересечения, между первым и вторым, между вторым и третьим, после третьего пересечения.

- С.** На какое наибольшее число областей делят плоскость 15 одинаковых по размеру квадратов, все стороны которых горизонтальны либо вертикальны?

Два одинаково ориентированных квадрата пересекаются максимум в двух точках (если не совпадают). Это значит, что  $k$ -ый нарисованный квадрат добавляет на картинку не более  $2(k - 1)$  новых областей. Отсюда ответ на задачу —  $2 + 2 + 4 + \dots + 2 \cdot 14 = 2 + 2 \cdot 105 = 312$ .

Изобразить 15 попарно пересекающихся квадратов несложно — достаточно взять один и 14 раз немного сдвинуть его по диагонали.

## Задача 2. Шутка

- А.** Ответ «нет» в задаче-шутке смотрелся бы странно, поэтому в этом пункте подразумевается ответ «да»: из башни можно откачать воздух и сделать лестницу почти отвесной — тогда стул без ножек может двигаться вертикально вниз так же, как и его 30-ногий собрат, но ему не будет мешать сопротивление воздуха, наличествующее снаружи башни; в общем, он окажется быстрее.
- В.** Пусть  $x_A$  задач было придумано вчера,  $x_B$  — сегодня и  $x_C$  — завтра. Тогда из условия

$$\begin{cases} x_B = 1.5(x_A + x_C) \\ x_B = 3x_C \\ x_A = 4 \end{cases}$$

Осталось только решить эти уравнения. Из первых двух легко вывести, что  $x_A = x_C$ , тогда  $x_B = 1.5 \cdot 8 = 12$ .

- С.** Автомобиль не сможет доехать до Пекина, так как за любое конечное время после своего старта он проезжает не более чем  $80 + 40 + 20 + \dots = 160$  километров.

## Задача 3. О, как мы далеки!

Смотреть задачу 5 варианта 4 класса.



## Задача 4. Простые, но такие сложные

**А.** Хотя бы одно из чисел  $p$ ,  $p + 2$ ,  $p + 4$  должно делиться на 3 — это можно понять, рассмотрев всевозможные остатки при делении  $p$  на 3. Единственное простое число, делящееся на 3, — это, собственно, 3.

$p + 4$  не может быть равно трём, потому что тогда  $p = -1$  — не простое.  $p + 2$  не может быть равно трём, потому что тогда  $p = 1$  — не простое. Остаётся единственный ответ —  $p = 3$ ,  $p + 2 = 5$ ,  $p + 4 = 7$ . Все эти числа простые.

**В.** Пусть  $n = p_1 \cdot p_2$ . Тогда  $n + 100 = (p_1 + 1)(p_2 + 1) = n + p_1 + p_2 + 1$ . Таким образом, мы ищем простые числа  $p_1$  и  $p_2$ , такие что  $p_1 + p_2 = 99$ . Сумма двух чисел нечётна — значит, одно из них обязательно должно быть чётным. Отсюда единственный ответ —  $p_1 = 2$ ,  $p_2 = 97$ .

**С.** Рассмотрим выключатель под номером  $k$ . Какие электрики переключат его? Очевидно, что те, номера которых являются делителями числа  $k$ . Изначально все выключатели выключенными, поэтому включенными в конце останутся те, номера которых имеют нечётное число делителей. Известный факт заключается в том, что этому условию удовлетворяют только квадраты натуральных чисел.

Таким образом, включенными останутся выключатели с номерами — полными квадратами.

## Задача 5. Неизвестные цифры

**А.** Заметим, что в слове «Мизантроп» 9 различных букв; а также буква Х, встречаясь в этом ребусе, является уже десятой. При этом ни одна из уже перечисленных нами букв не может быть равна нулю — в одном случае произведение в правой части получится нулевым, в другом же в числе ХРОМОТА окажется ведущий ноль.

**В.** Между младшим и предпоследним разрядами в этом примере должен был случиться перенос разряда, так как в противном случае  $E + E = *9$ , что невозможно из соображений чётности.

Отсюда  $E + E + 1$  должно оканчиваться на 9. Значит,  $E$  равно 4 или 9.

Если  $E$  равно 9, то  $M + M = 19$ , что невозможно ( $M \leq 9$ ).

Если  $E$  равно 4, то  $M+M=14$ , тогда  $M=7$ . Тогда посмотрим на букву  $P$ :  $P+P$  оканчивается на 4.

Тогда либо  $P$  равно либо 2, либо 7. Последний случай невозможен, так как тогда  $P$  совпадает с  $M$ . Значит, остаётся ребус вида  $2 \cdot K247 = Ж494$ . На значения букв  $K$  и  $Ж$  не влияют никакие другие части выражения, поэтому можно взять произвольное  $K$  от 1 до 4 и  $Ж=2 \cdot K$  — у ребуса будет 4 решения.

- С. Пусть на доске были написаны числа  $x_0 \dots x_9$ ,  $x_i = n + i$ ,  $n$  — какое-то натуральное.

Пусть стёрто число  $x_k$ . Тогда  $2017 = 9n + 1 + \dots + 9 - k$ . 2017 имеет остаток 1 при делении на 9, значит, и левая часть тоже должна иметь остаток 1.  $1 + \dots + 9 = 45$ , это делится на 9 — значит,  $k$  имеет остаток 8, и поэтому равно 8.

Значит, сумма 9 последовательных натуральных чисел равна 2015,  $9n = 1980$ ,  $n = 220$ . Поэтому с доски стёрто число 228.

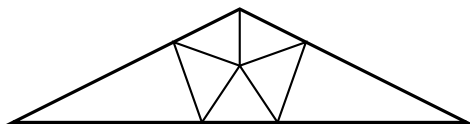
## Задача 6. И пусть Бетховен услышит

- А. Заметим, что клавиша с номером 45 находится ровно напротив клавиши с номером 1. Также заметим, что Лина нажимает симметричные клавиши, всё больше отдаляясь от первой: сначала первую справа, потом первую слева, потом вторую справа, потом вторую слева. Таким образом каждая клавиша окажется нажатой ровно один раз, и клавиша номер 45 будет последней — то есть, нажатой на 88-ом шаге.
- В. Заметим, что номера клавиш, на которых Лина поёт «ЛЯ», — это остатки степеней двойки (начиная с числа 2) при делении на 88. То есть, мы ищем наименьшую степень двойки, имеющую вид  $88k+48$ . Перебором можно установить, что это 4096. Отсюда на 4095 шаге Лина споёт «ЛЯ», нажимая на 48-ю клавишу.
- С. За одну мелодию Лина охватывает  $1 + 1 + 2 + 3 + \dots + 100 = \frac{100 \cdot 101}{2} + 1 = 5051$  клавиш. Значит, за всю игру ей будет охвачено  $1935 \cdot 5051$  клавиш, и нам нужно найти остаток этого числа при делении на 88, он и даст нам номер последней нажатой клавиши. Остаток числа 1935 равен  $-1$ , остаток числа 5051 — 35. Таким образом, последней нажатой клавишей будет  $88 - 35 = 53$ -я.

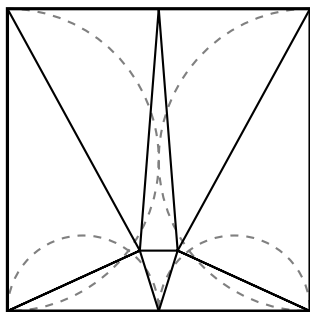
# Задачи 6 класса

## Задача 1. Разрезания и углы

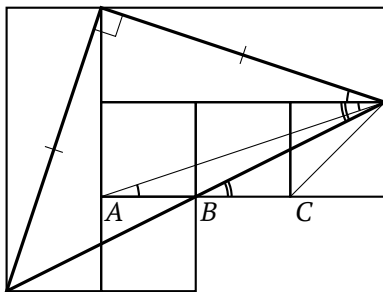
- А. С помощью линейки можно убедиться, что треугольник из условия задачи является равнобедренным. Давайте повернём его «правильно» и разрежем:



- В. Будем пользоваться следующим соображением: если вершина треугольника лежит за границами круга, диаметром которого является противоположная ей сторона, то угол в этой вершине острый.



- С. Смотреть рисунок: отмеченные углы равны в силу построения и теоремы о накрест лежащих углах.



Проведём ещё несколько дополнительных построений — получившийся треугольник будет прямоугольным и равнобедренным, то есть угол, равный сумме  $A$  и  $B$ , по величине равен  $45^\circ$  и, соответственно, углу  $C$ .

## Задача 2. Пока не пришёл лифтьёр

- А.** Если первый общий этаж для мальчиков — 123-ий, то  $\text{НОК}(n, m) = 123$  (так как первый общий этаж как раз и имеет номер, соответствующий наименьшему общему кратному).  $123 = 3 \cdot 41$ , поэтому  $n$  и  $m$  могут быть равным 1, 123 или 3, 41.
- В.** Без ограничения общности можно считать, что Витя находится на нулевом этаже, а Петя — на первом. Тогда Витин лифт перемещается только по этажам, номера которых делятся на  $k + 1$ . Если  $k = 0$ , Петя остаётся на месте, и Витя, конечно, может к нему приехать.
- Если же  $k > 0$ , то Витя не может приехать на первый этаж (1 не делится на  $k + 1$ ), поэтому если Петя просто будет оставаться на месте, он не встретится с Витей.
- С.** Заметим, что номер текущего этажа, на котором находится Витя, равен сумме со слагаемыми вида  $\pm m$  и  $\pm n$ . Любая такая сумма делится на  $\text{НОД}(n, m)$ , а единственный делитель единицы — это она сама. Поэтому  $\text{НОД}(n, m) = 1$ .

## Задача 3. На плоскости

- А.** Единственный способ расположить квадраты согласно условию — вдоль двух сторон квадрата  $18 \times 18$  уложить квадратики  $1 \times 1$ , а оставшееся место занять квадратом  $17 \times 17$ . Его площадь будет равна 289.
- В.** 12 заборов строятся в каком-то порядке, один за другим. Ни один, ни два забора ничего не отгораживают, как их ни поставь. Зато третий забор может, пересекая первый и второй, огородить одну область. И вообще —  $n$ -ый забор, пересекая все предыдущие, может отгородить  $n - 2$  новых области. Таким образом, ответ на эту задачу —  $1 + \dots + 10 = 55$ . Построить пример расстановки заборов, отгораживающей именно это количество областей, несложно.
- С.** Возьмём самую длинную сторону четырёхугольника  $ABCD$  — пусть это сторона  $AB$ . Один из углов, прилежащих к ней, должен быть острым (не умаляя общности — угол  $DAB$ ), иначе сторона  $CD$  будет длиннее  $AB$ . Рассмотрим сторону  $DA$  и вершину  $D$ .

Высота  $DH$  из точки  $D$  на сторону  $AB$  упадёт именно что на сторону  $AB$ , а не на её продолжение, так как иначе

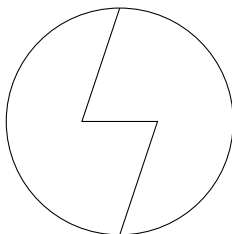
$$|AD|^2 \underset{\text{Th. Пифагора}}{=} |AH|^2 + |DH|^2 \underset{\substack{AH - \text{продол-} \\ \text{жение } AB}}{>} |AB|^2 + |DH|^2 > |AB|^2.$$

Откуда  $AD$  длиннее  $AB$ , что противоречит изначальному выбору стороны  $AB$ .

## Задача 4. Неземное стихосложение

А. Поэт в своём стихотворении занимается расложением последовательных чисел в сумму простых, меньших данного числа (например, число 4 он не использовал, придумывая разложение для шести). Записываются простые числа в порядке убывания. Поэтому следующие три строчки будут иметь вид:

В.



С. Будем соединять знакомых поэтов белой ниткой, а незнакомых — чёрной ниткой. Рассмотрим поэта Васю — к нему привязаны 2016 ниток, значит среди них уж точно есть три нитки одного цвета. Пусть это белые нитки. Рассмотрим поэтов, находящихся на других концах этих ниток.

Если какие-то два из этих трёх поэтов знакомы, то образуется белый треугольник из них и поэта Васи. Если же они все попарно незнакомы друг с другом — то нам не хуже, это тоже вариант из условия задачи.

## Задача 5. Простые, но такие сложные

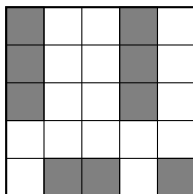
Смотреть задачу 4 варианта 5 класса.

## Задача 6. Шутка

Смотреть задачу 2 варианта 5 класса.

## Задача 7. Многонациональные захватчики

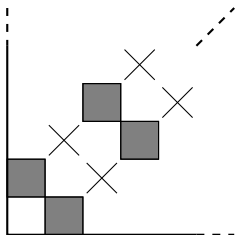
А. Пусть девять государств захватили отмеченные на рисунке клетки:



В. Пусть 99 государств захватили себе первые 99 клеток верхнего ряда таблицы, а сотое государство — вторую сверху клетку оставшегося столбца таблицы, где ещё не было ни одного государства.

Единственное государство, которое могло бы заселить оставшуюся клетку верхнего ряда, чтобы не нарушить условие задачи, — сотое. Однако и оно не может там обосноваться, потому что тогда в соответствующем столбце за ним будет целых две клетки.

С. При любом  $k$  захват клеток, описанный в условии, невозможен.



Будем смотреть на клетки, соседние с главной диагональю. Первые две из них должны быть захвачены, чтобы обеспечить двух захваченных соседей угловой клетке. Следующие две не могут быть захвачены, так как у второй клетки на диагонали уже есть два захваченных соседа. Так как размеры таблицы нечётны, получаем, что две соседних клетки противоположного угла таблицы должны быть не захвачены — и это будет нарушать условие задачи.

## Задача 8. Все числа состоят из цифр

А. Запишем условие из задачи:  $\overline{xy} = 3 \cdot \overline{yx}$ . Это значит то же, что

$$10x + y = 30y + 3x;$$

$$7x = 29y.$$

И правая, и левая части равенства должны делиться на 29. Это значит, что  $x$  делится на 29 — единственная цифра, кратная, 29, это ноль. Разумеется, при  $x = 0$  решений у данной задачи нет — значит, нет и вообще.

- В.** Последовательно будем интерпретировать условие задачи. То, что искомое число не делится на 10, значит, что  $Z \neq 0$ . То, что число  $YZ$  меньше 40, значит, что  $Y$  равен 0, 1, 2 или 3. Единственное двузначное число, являющееся квадратом и оканчивающееся на цифры 0–3 — это 81. Таким образом,  $X = 8$ ,  $Y = 1$ .

Наконец, для цифры  $Z$  остаётся два возможных варианта, чтобы число  $XYZ$  делилось на 9 — 0 и 9. Так как мы с самого начала поняли, что  $Z \neq 0$ , получается  $Z = 9$ .

Ответ: искомое число — 819.

- С.** Попробуем посчитать сумму цифр числа  $n$  — по признаку делимости на 9, её остаток будет таким же, как у самого числа  $n$ . 19 разрядов из 61 занимают двойки — если отбросить эти 19 разрядов, двоек и четвёрок будет поровну. Пусть четвёрки в числе занимают  $t$  разрядов. Тогда сумма цифр числа  $n$  равна

$$\begin{aligned} 19 \cdot 2 + 4 \cdot t + 2 \cdot t + 3 \cdot (61 - 19 - 2t) = \\ = 38 + 6t + 3 \cdot 42 - 6t = 38 + 42 = 80. \end{aligned}$$

Остаток при делении 80 на 9 равен 8 — значит, и число  $n$  сравнимо с 8 по модулю 9.

## Задачи 7 класса

### Задача 1. Переводчики с немецкого

- А.** Разложим на простые множители числа 116 и 217:  $116 = 2^2 \cdot 29$ ,  $217 = 7 \cdot 31$ . Эти числа взаимно просты, то есть, у них единственный

общий множитель — единица. Поэтому переводчику надо перевести 116 брошюр и 217 заметок.

- В.** Заметим, что если текстов каждой тематики было бы по одному и каждому переводчику надо было бы перевести ровно один текст, то у начальника не возникло бы проблем. Тогда давайте сведём задачу распределения  $3n$  текстов, по  $n$  на тему, к задаче распределения  $3(n-1)$  текстов, по  $n-1$  на тему.

Среди трёх переводчиков найдётся тот, кто указал наименьшее число различных тематик текстов в своём списке желаний. Выделим ему один текст одной из его желаемых тематик. Среди оставшихся двух переводчиков есть тот, у кого тематик поменьше. Он точно хочет себе хотя бы один текст тематики, отличной от той, которую мы уже дали первому переводчику. Выделим ему текст этой тематики.

Остался третий переводчик. Если он хотел себе текст третьей тематики, которая ещё никому не выдана, всё хорошо. Если вдруг он «заказывал» только два различных вида текстов, и это те самые виды, которые уже «отданы» первому и второму переводчикам, то у кого-то из них (предположим, у второго) в списке желаний есть третья тематика. Дадим ему эту самую третью тему, а третьему переводчику — то, что раньше было у второго.

Таким образом мы успешно раздали три текста — раздавая по три текста разных тематик, дойдём до ситуации, когда текстов осталось по одному.

- С.** Текст длины 1 бьётся одним способом, текст длины 2 — двумя способами. Теперь рассмотрим последнее слово в тексте из  $n$  слов — оно может быть либо самостоятельным, либо частью сочетания. В первом случае нам останется побить на слова и сочетания текст длины  $n-1$ , во втором — текст длины  $n-2$ .

Таким образом, ответ на задачу для  $n$  равен сумме ответов для  $n-1$  и  $n-2$ . Этому условию и полученным нами начальным данным удовлетворяет последовательность чисел Фибоначчи. Поэтому ответ —  $\mathcal{F}_n$ .

## Задача 2. Гонки улиток

- А.** Улитки доползут до верха одновременно — каждая за три дня.



**В.** Покрасим клетки листа в белый и чёрный, как на шахматной доске. Чёрных и белых клеток будет разное количество (всё-таки площадь листа нечётна), и при этом улитка переползает с белой клетки на чёрную, а с чёрной — на белую. Поэтому улиткам, стартовавшим в клетках цвета, которого больше, не хватит клеток цвета, которого меньше.

**С.** Пусть более быстрая улитка — верхняя. Тогда план её действий таков: спуститься вертикально вниз в точку, где сидела другая улитка, а затем догнать её по её же пути.

Пусть более быстрая улитка — нижняя. План её действий — поползти перпендикулярно от стены. Кратчайший путь от начального положения верхней улитки до точки, где находится нижняя улитка, всегда будет длиннее расстояния, пройденного нижней улиткой — поэтому более медленная верхняя не сможет её догнать.

### **Задача 3. Участники «Математики НОН-СТОП»**

**А.** Парты в одном из кабинетов, где проходит олимпиада, стоят в три колонки по шесть парт в каждой. За 20 минут до олимпиады в кабинете сидело 8 школьников. Докажите, что из кабинета пока что можно утащить две свободные парты, стоящие друг за другом. А если бы школьников было 9?

Побьём парты на пары стоящих друг за другом, по три пары в ряду. Получится девять пар, а школьников пока всего восемь. Значит, одна пара парт полностью свободна, и её можно утащить.

Если же школьников 9, то посадим по школьнику за 1, 3 и 5 парты каждого ряда — и ничего нельзя будет унести.

**В.** Пусть участников всего  $N$ . Если среди участников есть один, не знакомый ни с кем, то не может быть участника, знакомого со всеми. Если же есть участник, который со всеми знаком, то каждый знаком хоть с кем-то.

Таким образом, либо все участники знакомы с  $0-(N-2)$  людьми каждый, либо все они знакомы с  $1-N-1$  людьми каждый. В любом случае на  $N$  участников получается  $(N-1)$  вариантов, поэтому найдутся двое с одинаковым числом знакомых.

**С.** Возьмём шесть участников, нам хватит. Будем соединять красной линией знакомых, а синей линией — незнакомых. Все участники

окажутся попарно соединены.

Из каждого участника выходит по пять линий, значит как минимум три из них имеют один цвет. Пусть из данного участника выходит три красных линии — посмотрим на людей, в которых они приходят. Если между ними есть хоть одна красная линия, получается красный треугольник с участником, выбранным нами изначально. Если же между ними все линии синие, то это даёт нам синий треугольник, то есть они попарно незнакомы. Что и требовалось.

## Задача 4. Загадывание чисел

- А. Пусть оказалось, что  $a + b$  делится на  $b$ , где  $a$  и  $b$  — числа, загаданные мальчиками. Тогда

$$a + b = k \cdot b,$$

и, соответственно

$$a = (k - 1) \cdot b.$$

Таким образом,  $a$  делится на  $b$  — и наибольший общий делитель этих двух чисел равен  $b$ .

- В. Ответ на первый вопрос — да, конечно: 3 и 20 — взаимно простые числа, а их остатки от деления на 17 совпадают и, разумеется, не взаимно просты.

Чтобы показать, что числа  $a$  и  $b$  из второго вопроса пункта обязаны быть взаимно простыми, рассмотрим число

$$\max(a, b) + 1.$$

Остатки при делении чисел  $a$  и  $b$  на него равны им самим и по условию взаимно просты — значит,  $a$  и  $b$  взаимно просты.

- С. Наша задача — решить уравнение

$$(x + 3)(x + 4)(x + 5)(x + 6) = 288.$$

Рассмотрим произведения пары крайних множителей и пары средних множителей:

$$(x^2 + 9x + 18)(x^2 + 9x + 20) = 288.$$

Иными, словами,

$$Y(Y + 2) = 288.$$

Разложим число 288 на множители:  $288 = 2^5 \cdot 3^2$ . Получается, есть ровно два способа представить 288 в виде произведения двух чисел, различающихся на 2:  $16 \cdot 18$  и  $(-18) \cdot (-16)$ .

В каждом из этих двух случаев, чтобы найти  $x$ , нужно либо решить квадратное уравнение, либо, например, представить  $-18$  в виде произведения двух чисел, различающихся на 3 — одно из них и будет  $x + 3$ . Ни то, ни другое не представляет труда.

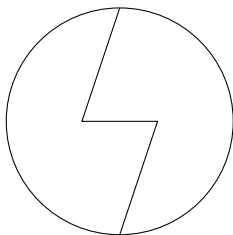
## Задача 5. Многонациональные захватчики

Смотреть задачу 7 варианта 6 класса.

## Задача 6. Порезать торт на День рождения

**А.** Проведём три параллельных разреза через торт. Если они вместе с какими тремя разрезами образуют замкнутую ломаную, то есть звено, идущее от одного крайнего разреза к другому — то есть, пересекающее средний разрез. Таким образом, построить несамопересекающуюся ломаную нельзя.

**В.**



**С.** Задача сводится к задаче разрезания квадрата на пять фигур одинаковой площади и с одинаковой длиной пересечения с внешними сторонами квадрата. Для этого разделим каждую сторону квадрата на пять равных по длине отрезков и соединим концы этих отрезков с центром квадрата. Получим 20 треугольников одинаковой площади с одинаковой длиной основания. Искомые фигуры получим, объединяя соседние треугольники по четыре штуки.

Разрезание куба строится из разрезания квадрата просто: достаточно «протащить» разрезание квадрата через куб по вертикали.

## Задача 7. Взвешивания

- А. Пусть картофель весит  $P$  граммов, а кот —  $K$  граммов. Пусть погрешность составляет  $M$  граммов.

Тогда  $P + M = 1000$ ,  $K + M = 4400$ ,  $P + K + M = 5000$ . Отсюда  $P = 600$  (вычтем из третьего равенства второе),  $K = 4000$  (вычтем из третьего первое),  $M = 400$ .

- В. Поделим 729 монет на три равных кучки. Положим две из них на весы — если одна из них окажется легче другой, то в ней находится фальшивая монета. Если они равны по весу, то фальшивая монета находится в оставшейся трети.

Таким образом, за один ход мы умеем уменьшать количество «подозреваемых» монет втрое.  $729 = 3^6$ , поэтому через шесть ходов останется одна монета, которая может быть фальшивой — она и окажется фальшивой.

- С. Выложим на весы одну монету из первого мешка, две монеты из второго мешка, ... 15 монет из 15-го мешка. Если бы все монеты были настоящими, их суммарная масса была бы равна  $20 \cdot (1 + \dots + 15)$  граммов. По факту мы получим большую массу — она будет отличаться от приведённой нами ранее на  $5 \cdot (N^\circ \text{ мешка с фальшивыми монетами})$  граммов. Так мы и выясним, где фальшивки.

## Задача 8. Шутка

Смотреть задачу 2 варианта 5 класса.

## Задача 9. Вовочка и клетчатая тетрадь

- А. У Вовочки есть клетчатая тетрадь (клетки — одинаковые, квадратные), линейка без делений и карандаш. Площадь каждой клетки в тетради —  $100 \text{ мм}^2$ . Как Вовочке имеющимися средствами построить квадрат площадью  $1000 \text{ мм}^2$ ?

Заметим, что  $10^2 + 30^2 = 1000$ . То есть, прямоугольный треугольник с катетами 10 мм, 30 мм (который легко нарисовать по клеткам) имеет гипотенузу  $\sqrt{1000} \text{ мм}$ .

Расположив четыре таких треугольника, как показано на рисунке, получим квадрат со стороной  $\sqrt{1000} \text{ мм}$ , площадь которого равна  $1000 \text{ мм}^2$ .

**В. Здесь должна быть картинка**

Смотреть рисунок.

- С.** Аналогично пункту В данной задачи мы умеем делить на произвольное количество частей любой отрезок, начало и конец которого — узлы сетки. Также  $80 \cdot 25 = 2000$  — поэтому, если мы научимся строить треугольник площадью  $\sqrt{2000} \text{ мм}^2$ , мы сможем поделить каждую из его сторон на пять частей и получить 25 квадратов нужной нам площади в  $80 \text{ мм}^2$ .

Наконец,  $2000 = 20^2 + 40^2$ ; далее аналогично пункту А.

## **Задача 10. Игра**

- А.** Это игра–шутка: значение суммы не зависит от расстановки в ней скобок — сумма в любом случае будет равна 2017, то есть нечётна. Отсюда победит первый игрок.

- В.** У первого игрока есть выигрышная стратегия. Первым ходом он должен переложить 3 камня из первой кучки во вторую. Затем он должен реагировать на ходы второго игрока следующим образом:

Если второй перекладывает  $x$  камней из первой кучки во вторую, то первый должен переложить  $5 - x$  камней также из первой кучки во вторую.

Если же второй перекладывает камни из второй кучки в первую, то первый должен вернуть эти камни обратно во вторую кучку.

Заметим, что после хода первого игрока количество камней во второй кучке всегда имеет остаток 3 от деления на 5, а после хода второго игрока количество камней во второй кучке никогда не имеет такого остатка. Это значит, что второй игрок не может переложить все камни во вторую кучку, вынудив первого сделать ход, при котором ему придётся выкидывать камни из мешка.

То есть, (а) первый всегда может сделать ход, соответствующей придуманной нами стратегии, (б) выкидыванием камней из мешка занимается исключительно второй игрок. Он и проиграет.

- С.** Начнём со случая  $n = 13$ . Если первый игрок взял  $k$  камней, то второй может взять  $13 - k$  и победить. Если  $n$  не превосходит 14 и не равно 13, то все камни может взять за один ход первый игрок.

Для  $n \geq 15$  рассмотрим два случая:

$n$  делится на 13. Заметим, что после любого хода первого игрока оставшееся количество камней не будет делиться на 13. Зато второй в случае любого хода первого сможет сделать так, что после его хода количество камней, оставшихся в кучке, будет вновь делиться на 13. Для этого на взятие  $k$  камней,  $1 \leq k \leq 12$ , нужно ответить взятием  $13 - k$  камней, на взятие 14 камней — 12 камнями, а на взятие 15 камней — 11 камнями. Ноль делится на 13 — кучка может остаться пустой только после хода второго игрока.

$n$  не делится на 13. Тогда выигрышная стратегия есть у первого игрока. Своим первым ходом он берёт от 1 до 12 камней так, чтобы осталось количество, кратное 13 — а затем играет так, как играл бы второй игрок в предыдущем пункте.

Ответ: если  $n$  делится на 13, выигрывает второй игрок; иначе выигрывает первый.

## Задачи 8 класса

### Задача 1. Неизвестные цифры

Смотреть задачу 5 варианта 5 класса.

### Задача 2. Искусное владение числами

А.

8	3	4
1	5	9
6	7	2

В. 15317.

С. Давайте искать число, делящееся на 144: это число *несильно*, но *достаточно* больше 95, и делимость на него очень просто проверить:  $144 = 16 \cdot 9$ : делимость на 16 зависит от последних четырёх цифр, а делимость на 9 — от суммы цифр в целом, которая и так будет равна 144.

Положим последние четыре цифры равными 3232 — нам останется распределить 134 на 91 разряд. Для этого воспользуемся 43 двойками и 48 единицами.

### Задача 3. Плавающий зоопарк

А. Здесь должна быть картинка.

В. Конечно же, минимальное количество углов у пересечения — 3. Если мы найдём максимальное количество и приведём пример, когда оно достигается, то все промежуточные количества углов будет несложно получить.

Верхняя оценка на количество углов — 24: каждая из шести сторон шестиугольника могла бы пересекать каждую из четырёх сторон четырёхугольника. В свою очередь, пример, когда пересечение фигур — 6 четырёхугольников, легко построить.

С. Если  $m$  и  $n$  чётны, то ответ — от трёх до  $mn$  углов (смотреть предыдущий пункт). Если  $m$  чётно,  $n$  нечётно, то каждая из  $m$  сторон  $m$ -угольника пересекает не более  $n - 1$  стороны  $n$ -угольника, так как количество точек пересечения любой прямой с любым многоугольником чётно: прямая должна «входить» и «выходить» из многоугольника. Пример, когда пересечение имеет  $m(n - 1)$  углов, строится по аналогии с первым пунктом.

При нечётных  $m$  и  $n$  ответ —  $(m - 1)(n - 1)$ , пример приводится аналогично. Больше углов пересечение не может иметь по следующей причине:  $m$  угольник не может пересечь  $n$ -угольник «слева направо» больше  $m - 1$  раза, и каждое пересечение будет давать в среднем не более  $n - 1$  угла.

### Задача 4. Вовочка и клетчатая тетрадь

Смотреть задачу 9 варианта 7 класса.

### Задача 5. Загадывание чисел

Смотреть задачу 4 варианта 7 класса.

### Задача 6. Пути автобуса неисповедимы

А. Описанная в условии задачи ситуация возможна при любом количестве городов — достаточно соединить все города дорогами по кругу, «хороводом», и 4 марта отправить автобус из каждого города в следующий.

- В.** Автобусов, выехавших из городов на П (и, соответственно, приехавших в города на К) больше, чем собственно городов на К. В силу принципа Дирихле, в каком-то городе на К будет больше одного автобуса.
- С.** Если автобусы смогли разъехаться, то либо четыре города оказались разбиты на пары так, что автобусы из городов пары поменялись местами, либо из четырёх городов собрался цикл, и каждый автобус отправился в следующий город цикла.

**Здесь должна быть картинка.**

Есть три способа разбить четыре города на пары и три способа провести через них цикл длины 4 — такие соединения дорогами нам подходят. Также подойдёт любая ситуация, которая «надстроена» над перечисленными нами: то есть, взять все дороги и добавлены какие-то ещё.

## Задача 7. Переводчики с немецкого

Смотреть задачу 1 варианта 7 класса.

## Задача 8. Примечательный учебный день

- А.** К высоте  $m$  метров дерево подходит, имея  $(m - 1)!$  ветвей. Соответственно, ответ на задачу —  $11!$  веток.
- В.** Очевидно, что больше 13 рассадок не бывает: мальчик обязан сидеть с одной из девочек. 13 же рассадок реализовать просто: нужно взять какую-то рассадку, и каждый день сдвигать девочек относительно мальчиков «по кругу».
- С.** Давайте решим задачу в общем случае: есть класс из  $4k + 2$  человек — придумать  $4k + 1$  способов рассадить их за парты так, чтобы одна пара не появлялась в двух разных рассадках (больше нельзя по очевидной причине — каждый человек может сидеть не более чем с  $4k + 1$  другими).

Будем изображать  $i$ -ую рассадку, ставя число  $i$  в клетки таблицы  $(4k + 2) \times (4k + 2)$ , из которой выкинута центральная диагональ. Наша задача тогда — расставить числа от 1 до  $4k + 1$  в клетки таблицы, так чтобы (а) каждое число было написано ровно  $2k$  раз (б) встречалось в каждом столбце и каждой строке ровно по одному разу (в)



его вхождения в таблицу были бы симметричны относительно центральной диагонали. Построим расстановку.

В первую строку таблицы впишем числа от 1 до  $4k + 1$  справа налево, а в первый столбец — снизу вверх. Заполняя  $i$ -ую строку,  $1 < i < 4k - 1$ , поступим так: зарезервируем самую правую клетку строки, не будем её трогать; в остальные клетки впишем числа от 1 до  $4k + 1$ , сдвинув их на одну клетку влево относительно предыдущей строки. После этого в самую правую клетку запишем число, которое должно было стоять на центральной диагонали. Последнюю строку получим отражением относительно центральной диагонали уже сформированного последнего столбца.

Приведём пример такой таблицы для  $k = 2$  (в задаче было  $k = 6$ ):

	9	8	7	6	5	4	3	2	1
9			7	6	5	4	3	2	1
8	7			5	4	3	2	1	9
7	6	5			3	2	1	9	8
6	5	4	3			1	9	8	7
5	4	3	2	1			8	7	6
4	3	2	1	9	8			6	5
3	2	1	9	8	7	6			4
2	1	9	8	7	6	5	4		
1	8	6	4	2	9	7	5	3	

Несложно убедиться в том, что она обладает нужными нам свойствами.

## Задача 9. О числах маленьких и больших

А. Без ограничения общности будем считать, что  $b \geq a \geq 2$ . Тогда

$$a + b \stackrel{(1)}{\leq} 2 \cdot \max(a, b) \stackrel{(2)}{\leq} \min(a, b) \cdot \max(a, b) = a \cdot b.$$

Теперь, если оба числа  $a, b$  строго больше двух, то неравенство (2) становится строгим, а если только одно — то неравенство (1) становится строгим. Что и требовалось.

В. (а): Пусть  $a$  — первая цифра числа  $X$ .

Чтобы найти число  $X$ , которое при удалении первой цифры станет в 57 раз меньше, нужно придумать такую цифру  $a$ , что  $a \cdot 10^{\dots} = 56 \cdot (X - a \cdot 10^{\dots})$ . Для этого, в частности, число  $a00 \dots 0$  должно делиться на 56. Число 70000 отлично подойдёт. Получаем ответ:

$$1250 \cdot 57 = 71250.$$

(б): Чтобы найти ответ в этом пункте, нужно подобрать такую цифру  $a$ , что  $a00 \dots 0$  делится на 57. Пусть такая есть:  $57 \mid a \cdot 10^k$ . 10 взаимно просто с 57, поэтому тогда  $57 \mid a \cdot 10^{k-1}$ . Продолжая уменьшать степень десятки, пользуясь этим соображением, получим  $57 \mid a$ . Но ненулевая цифра не может делиться на 57 — получаем противоречие.

- С. Отдельно рассмотрим случай  $n = 4$ :  $4 = 2 \cdot 2 = 2 + 2$ . Если же составное  $n$  строго больше четырёх, что его можно представить в виде  $a \cdot b$ ,  $a \geq 2, b > 2$ .

Из пункта А мы знаем, что тогда  $a + b < a \cdot b = n$ . Тогда можно взять  $n - a - b$  единиц, и получить

$$a + b + 1 + \dots + 1 = a \cdot b \cdot 1 \cdot \dots \cdot 1 = n.$$

## Задача 10. Игра

Смотреть задачу 10 варианта 7 класса.

## Задача 11. Возводим в степень

- А. Подойдёт, например, 423 (делится на 9), 424 (делится на 4), 425 (делится на 25).

- В. Укажите наименьшее натуральное число такое, что его половина — квадрат натурального числа, его треть — куб натурального числа, а его пятая часть — пятая степень натурального числа.

Будем искать это число в виде  $2^m 3^n 5^k$ : по условию, эти множители должны в него входить, а лишнего нам не надо. Ясно следующее:

$m$  делится на 3 и на 5, но нечётно;

$n$  делится на 2 и на 5, но имеет остаток 1 по модулю 3;

$k$  делится на 2 и на 3, но имеет остаток 1 по модулю 5.

Найдём наименьшие подходящие  $m$ ,  $n$  и  $k$  — это 15, 10 и 6. Ответ:  $2^{15} \cdot 3^{10} \cdot 5^6$ .

С. Пусть нам надо придумать цепочку длины  $n$ . Возьмём  $n$  произвольных простых чисел  $p_1 \dots p_n$  — их квадраты являются попарно взаимно простыми.

В силу Китайской теоремы об остатках найдётся достаточно большое число  $N$ , сравнимое с  $i$  по модулю  $p_i^2$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Искомой цепочкой будет  $N - n \dots N - 1$ .

## Задача 12. Шутка

Смотреть задачу 2 варианта 5 класса.

## Задачи профильного варианта 7 класса

Смотреть задачу 2–3 варианта 8 класса.

## Задачи профильного варианта 8 класса

### Задача 1. Через тернии к звёздам

1. Кратчайший путь между  $A$  и  $C$  проходит либо через  $B$ , либо не затрагивая её. В первом случае  $d(A, B) + d(B, C) = d(A, C)$ , во втором случае  $d(A, B) + d(B, C) \leq d(A, C)$ , потому что кратчайший путь между  $A$  и  $C$ , проходящий через  $B$ , не может быть короче пути, кратчайшего вообще.

2. Наибольшее возможное расстояние между вершинами  $n$ -угольника равно  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ , все значения расстояния от 0 до этого числа достигаются. На расстоянии от данной вершины, строго меньшем, чем  $\frac{n}{2}$ , всегда находятся ровно две других.

Если  $n$  чётное, то есть одна вершина, находящаяся от данной на расстоянии  $\frac{n}{2}$ , она же наиболее удалённая. Если  $n$  нечётное, то наиболее удалены от данной две вершины, находящиеся на расстоянии  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$  от неё — справа и слева.

3. Пусть все стороны многоугольника, кроме одной, имеют «вес» 1, а оставшаяся — «вес» 2. Расстояние между вершинами будем считать

как сумму весов сторон, по которым проходит кратчайший путь между ними. Для такого расстояния даже выполнено неравенство треугольника, а также оно зависит от выбора «тяжёлой» стороны — то есть, будет меняться при вращении многоугольника.

Определим

$$\delta(A, B) = \begin{cases} 0, & A = B; \\ 1, & A \neq B \end{cases}$$

Для этого расстояния также выполнено неравенство треугольника, и оно, очевидно, не получается из взятого в условии задачи умножением на число, потому что расстояния между любыми двумя не равными вершинами одинаково.

4. Докажем, что  $(n, k)$ -звезда состоит из одной ломаной  $\iff$  числа  $n$  и  $k$  взаимно просты. Для удобства пронумеруем вершины  $n$ -угольника числами от 0 до  $n-1$  по часовой стрелке. Заметим, что расстояние между вершинами равно  $k$  тогда и только тогда, когда разность их номеров равна  $k$ ,  $-k$  или  $n-k$  — то есть, её модуль имеет остаток  $k$  при делении на  $n$ .

$\Leftarrow$  Пусть одна ломаная соединяет все вершины правильного  $n$ -угольника. Значит, у неё есть ребро, выходящее из нулевой вершины и идущее в сторону «по часовой стрелке». Оно приходит в вершину  $\text{№}k$ . Следующее — в вершину  $\text{№}2k \bmod n$ . Следующее за ним — в вершину  $\text{№}3k \bmod n$ , и так далее.

Что представляет из себя, например, число  $3k \bmod n$ ? Это, на самом деле, разность  $3k - n - \dots - n$ . Если НОД чисел  $n$  и  $k$  не равен единице, то все числа вида  $i \cdot k \bmod n$  будут делиться на этот НОД. Это значит, что последовательность рёбер, которую мы начали, выходя из нулевой вершины, не посетит вершину  $\text{№}1$ .

$\Rightarrow$  Пусть  $\text{НОД}(n, k) = 1$ , но ломаная, проходящая через нулевую вершину, не покрывает всех вершин многоугольника. Тогда среди чисел  $0 \cdot k, 1 \cdot k, \dots, (n-1) \cdot k$  (это номера вершин, через которые проходит ломаная) в силу принципа Дирихле есть два сравнимых

по модулю  $n$  (соответствующих одной вершине многоугольника).

$$a_1 \cdot k - a_2 \cdot k \text{ делится на } n;$$

$$(a_1 - a_2) \cdot k \text{ делится на } n, \quad |a_1 - a_2| < n;$$

$$(k \text{ взаимно просто с } n)$$

$$a_1 - a_2 \text{ делится на } n \Rightarrow a_1 - a_2 = 0.$$

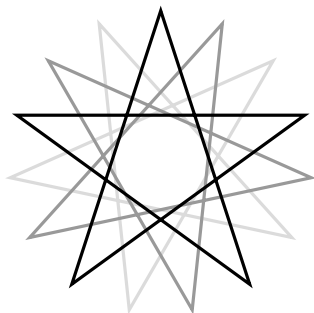
Получили противоречие: числа  $a_1 k$  и  $a_2 k$  не могли оказаться различными.

Доказав это утверждение, мы можем запросто ответить на вопрос задачи: звёзд, состоящих из одной ломаной, ровно столько, сколько чисел  $1 \leq k < n$ , взаимно простых с  $n$  — то есть,  $\varphi(n)$ .

5.

$$\text{НОД} \left( \frac{n}{\text{НОД}(n, k)}, \frac{k}{\text{НОД}(n, k)} \right) = 1;$$

Поэтому звезда с такими параметрами будет состоять из одной ломаной. В свою очередь,  $(n, k)$ -звезда получится, если между двумя соседними вершинами этой звезды вставить ещё  $\text{НОД}(n, k) - 1$  вершин и скопировать звезду из одной ломаной, повернув её на  $360/k$  градусов — смотреть рисунок:



$(15, 6)$ -звезда

Таким образом,  $(n, k)$ -звезда состоит из  $\text{НОД}(n, k)$  ломаных. Следствием этого пункта является то, что количество ломаных в звезде всегда делит  $n$ .

6. В этом пункте требуется найти количество  $k$ ,  $1 \leq k < n$ , таких что  $\text{НОД}(n, k) = \ell$ . Оно, очевидно, равно  $\varphi(\frac{n}{\ell})$ : все такие  $k$  находятся среди чисел, кратных  $\ell$ , и  $\text{НОД}(\frac{n}{\ell}, \frac{k}{\ell}) = 1$ .

7. Количество различных звёзд равно  $n$ : есть  $(n, 1)-$ ,  $(n, 2)-$ , ...,  $(n, n)-$  звёзды (последнюю можно мыслить как множество несоединённых вершин, в ней будет  $n$  ломаных). Все звёзды бьются на группы по количеству ломаных, которое в них содержится — в группе с  $\ell$  ломаными находится  $\varphi\left(\frac{n}{\ell}\right)$  звёзд.

При этом, если перечислять все числа вида  $\left(\frac{n}{\ell}\right)(\ell)$ , в этом списке появятся все возможные делители  $n$ . То есть,

$$n = \sum_{\ell \text{ делит } n} \varphi\left(\frac{n}{\ell}\right) = \sum_{d \text{ делит } n} d.$$

Что и требовалось доказать.

## Задача 2. Без нулей

1.

$$\begin{array}{ll} 110 \rightarrow XX & 1X17 \rightarrow 2017 \\ 2202 \rightarrow 21X2 & XXXX \rightarrow 11110 \\ 500000 \rightarrow 49999X & 512 \rightarrow 512 \end{array}$$

2. Значение числа  $\overline{c_n c_{n-1} \dots c_0}$  восстанавливается по его записи в модифицированной системе счисления так же, как по десятичной записи:  $\sum c_k 10^k$ , где  $X$  интерпретируется как 10.

Пусть  $N = \overline{c_n c_{n-1} \dots c_0} = \overline{s_n s_{n-1} \dots s_0}$ . Давайте формально вычтем эти два выражения друг из друга. Получим

$$0 = \sum_{k=0}^n (c_k - s_k) \cdot 10^k, \quad -9 \leq c_k - s_k \leq 9.$$

Пусть старший разряд, в котором различаются записи числа  $N$ , имеет номер  $M$ . Тогда

$$\begin{aligned} c_M - s_M &= - \sum_{0 \leq k < M} (c_k - s_k) \cdot 10^k \\ 10^M &\leq |c_M - s_M| \leq \sum_{0 \leq k < M} |c_k - s_k| \cdot 10^k \leq \\ &\leq 9 \cdot (1 + 10 + \dots + 10^{M-1}) = 10^M - 1. \end{aligned}$$

Получили противоречие.

3. Опишите алгоритм перевода чисел из десятичной системы в модифицированную и обратно.

Перевести из модифицированной в десятичную совсем просто: надо все разряды, в которых стоят X, заменить на нули — и сложить получившееся число в столбик с числом, которое состоит в основном из нулей, а единицы стоят в разрядах, предшествующих тем, где в исходном числе стояли X:

$$\begin{array}{r} 9 \quad 0 \quad 0 \quad 7 \\ 9XX7 = \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \\ \hline 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 7 \end{array}$$

Для перевода из десятичной в модифицированную будем пользоваться тем соображением, что

$$\overline{k}000 \dots 00 = \overline{k-1}999 \dots 9X.$$

Будем «читать» число справа налево и заменять блоки нулей, согласно установленному нами правилу:

$$\begin{array}{l} 10100560075 | \\ 101005600 | 75 \\ 1010055 | 9X75 \end{array}$$

При этом слева от нас могут появляться новые нули, но справа нулей точно не остаётся:

$$\begin{array}{l} 10100 | 559X75 \\ 100 | 9X559X75 \end{array}$$

Наконец, если первая цифра в числе — ноль, то от неё просто избавимся, уменьшив количество разрядов:

$$| 9X9X559X75$$

4. Запись X, несомненно, короче, чем 10 — но почему запись в модифицированной системе счисления не бывает длиннее?

С одной стороны, допустимые вклады каждого разряда в число стали не меньше, так что надобности в большем количестве разрядов просто неоткуда взяться. С другой стороны, у нас есть процедура построения записи и доказательство её единственности — заметим, что мы нигде не изменяем количество разрядов в числе, разве что в самом конце, избавляясь от ведущего нуля.

5. Идея за сложением и умножением в столбик, несомненно, будет стоять всё та же; различия будут заключаться в некоторых технических деталях:

*цифра* + X = *цифра* и перенос единицы в следующий разряд;

*перенос* + X = *перенос* и перенос единицы в следующий разряд;

5 + 5 = X, без переноса в следующий разряд;

X + X = X и перенос единицы в следующий разряд;

*перенос* + X + X = *перенос* и перенос двойки в следующий разряд;

*цифра* · X = X и перенос (*цифра* − 1) в следующий разряд.

6. Можно, например, домножать на −1 только старший разряд, записывая, например, знакомое нам  $-15949 = -20000 + 4501 = -2\ 44X1$ . Тогда ноль будет записываться как −1 X.

7. Признак делимости на степени двойки будет таким же, как в десятичной системе счисления: всё потому, что число, в котором отбросили последние  $k$  разрядов, будет делиться на  $10^k$ , а, значит, и на  $2^k$ .

Признак делимости на степени пятёрки аналогичен предыдущему.

Признак делимости на 3 и 9 — число сравнимо по модулю 3 (9) со своей суммой цифр — по-прежнему работает:

$$\overline{c_n c_{n-1} \dots c_0} = \sum c_k 10^k \equiv \sum c_k \pmod{3}.$$

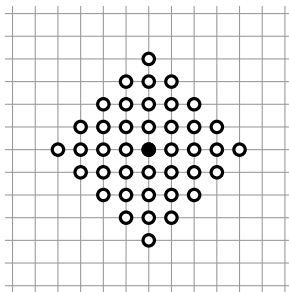
Признак делимости на 11 — число сравнимо по модулю 11 со своей знакопередающей суммой цифр — также остаётся тем же:

$$\overline{c_n c_{n-1} \dots c_0} = \sum c_k 10^k \equiv \sum c_k (-1)^k \pmod{11}.$$



### Задача 3. Дорога до метро

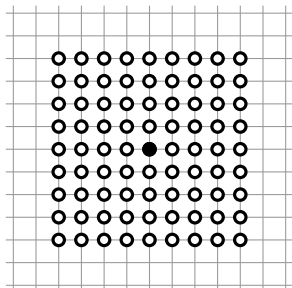
1. Нас интересуют точки, сумма смещений которых по горизонтали и по вертикали относительно выбранного узла не превосходит 4. Множество этих точек выглядит так:



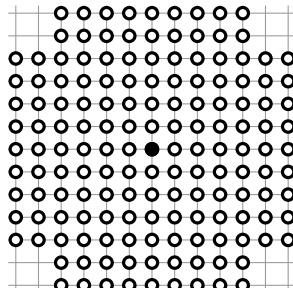
2. Если определять длину пути как максимум из смещений, то в 4-окрестности будут лежать точки, каждая координата которых отличается от соответствующей координаты выбранной не более чем на 4.

Если же определять её как минимум, то в окрестность попадут точки, хотя бы одна из координат которых отличается от координаты исходной не более чем на 4 — получится крест, лучи которого продолжаются бесконечно далеко по горизонтали и вертикали.

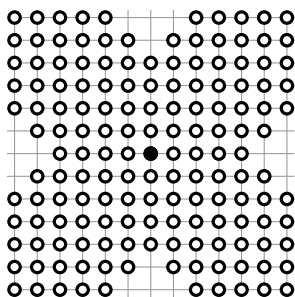
Максимум:



Минимум:



Наконец, если длина пути определена как модуль разности смещений, то в 4-окрестность попадут точки, лежащие на расстоянии не более четырёх от двух диагоналей, проходящих через выбранный узел:



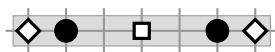
3. Заметим, что длина кратчайшего пути между двумя точками в классическом смысле равна сумме его смещений по горизонтали и вертикали, так как кратчайший путь использует только одно из двух вертикальных и одно из двух горизонтальных направлений.

Значит, путь «классической» длины, не превосходящей  $n$ , связывает два узла из сетки тогда и только тогда, когда между этими узлами существует путь длины «в смысле первого пункта», не превосходящей  $n$ . Что и требовалось.

4. Всякий кратчайший путь из  $A$  в  $B$  будет использовать ровно  $m + n$  рёбер, из которых ровно  $n$  будут проходиться в направлении сверху вниз, а остальные  $m$  — слева направо. Значит, для построения кратчайшего пути нам нужно выбрать те  $n$  рёбер из имеющихся  $m + n$ , которые мы будем проходить сверху вниз. Это можно сделать

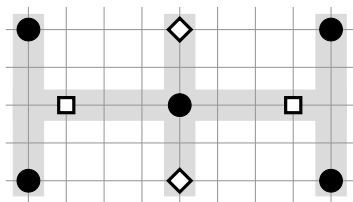
$$C_{m+n}^n = C_{m+n}^m \text{ способами.}$$

5. Пусть город состоит из шести узлов, изображённых ниже; станции метро отмечены чёрными кружками. Тогда максимальное кратчайшее расстояние (равное 2) достигается в узле, отмеченном квадратом (для остальных узлов есть станция метро, находящаяся не более чем в одном шаге от них). А максимальная сумма расстояний (равная 6) достигается в узлах, отмеченных ромбиками: в остальных узлах эта сумма равна 4 или 5.



6. Среднее расстояние до станций получается из суммы всех расстояний делением на количество станций — значит, максимума они достигают одновременно.

7.



Рассмотрим город, изображённый на рисунке. Кратчайшее расстояние достигает своего максимума, равного 3, в узлах, отмеченных квадратами. Максимальное наибольшее расстояние, равное 12, достигается в четырёх узлах по краям города, где расположены станции.

Наконец, максимальная сумма расстояний, равная 34, достигается в узлах, отмеченных ромбиками: для того, чтобы дойти от них до станций метро, нужно всякий раз проходить по «отросткам», в конце которых расположены ромбики, что добавляет дополнительные 10 к сумме расстояний до станций.

# Задачи 2016 года

## Задачи 5 класса

### Задача 1. Шутка

А. Поскольку это — шутка, засчитывался любой минимально обоснованный ответ. Например, можно предположить, что на третий раз не сломается ни одной ножки, так как в ходе предыдущих двух падений все шаткие ножки уже сломались.

Если же решать задачу всерьёз, то легко увидеть, что указанных исходных данных недостаточно для ответа на вопрос.

В. Обозначим стоимость книги за  $b$ . Осталось заплатить за книгу  $b - 200$ . Половина заплаченного — 100, половина заплаченного плюс осталось заплатить —  $b - 200 + 100 = b - 100$ . Осталось бы заплатить, если заплачена половина заплаченного плюс осталось заплатить —  $b - (b - 100) = 100$ . И мы знаем, что  $b - 200 = 3 \cdot 100$ . Отсюда стоимость книги — 500 рублей.

С. Путешественник отправился вокруг света на восток, его дорога заняла 80 дней ( $80 \cdot 24$  часов, чтобы быть точным). Каждый день путешественник ночует на  $\frac{1}{80}$  длины экватора восточнее, то есть солнце в зените оказывается на  $\frac{1}{80}$  часть суток раньше, чем в месте предыдущей ночёвки и время между ночёвками у него составит только 23.7 часа (да, возможно он не будет высыпаться, но это уже другая история).

В момент возврата в точку отправления окажется, что за 80 дней для путешественника солнце было в зените  $80 \cdot 24 \div 23.7 \approx 81$  раз, и календари у путешественника и у ждущих его людей разойдутся. Для избежания таких расхождений при движении с запада на восток при пересечении линии перемены дат принято перелистывать календарь на один день назад.

Представим теперь, что путешественник обходит землю не рядом с экватором, а вокруг полюса по кругу маленького радиуса. В про-

цессе обхода путешественник будет быстро сменять часовые пояса: если он, к примеру, начнёт движение в полночь 31 декабря от линии перемены дат, то через несколько сот метров он придёт в место, где местное время уже 5 часов утра, потом, ещё чуть дальше, будет 18 часов вечера... Путешественник за какой-нибудь час «проживёт» день 31 декабря, подойдёт к линии перемены дат в 23:59 по местному времени последнего перед линией часового пояса, подождёт чуток, чтобы на часах появилось 0:00, поздравит всех с Новым годом, а затем, сделав ещё два шага вперёд через линию, вернётся в ночь 31 декабря.

Во всех этих случаях не совершается какого-то необычного путешествия во времени — совершается путешествие по часовым поясам. А добавление или исчезновение дня возникает за счёт изменения продолжительности суток. Космонавты на МКС, совершающей оборот вокруг Земли каждые два часа, во избежание путаницы не обращают внимание на местное время и живут по гринвичскому времени (по времени нулевого меридиана).

## Задача 2. Числа и суммы

- А.** Число 0 меньше количества цифр в нём. Число 0.1 меньше собственной суммы цифр.
- В.** Если в числе во всех разрядах, кроме старшего — девятки, то само это число (любое меньшее число неизбежно будет иметь меньшие цифры хоть в одном разряде, и не будет иметь бо́льших цифр).
- В противном случае, нужно вычесть 1 из цифры в старшем разряде (а если там и так 1 — отбросить его), а числа во всех остальных разрядах заменить на 9. В самом деле, чтобы ещё увеличить сумму цифр такого числа, надо увеличивать (или добавлять) старший разряд, а сделав это, мы получим число, большее исходного.
- С.** Петя сложил все числа от 1 до  $m \cdot n$ , а Вася сложил все числа от 1 до  $m$ , от 1 до  $n$  и посчитал произведение этих двух сумм. У кого в итоге получилось большее число?

## Задача 3. Деление и остатки

- А.** Если  $d$  делится на 564, то существует такой  $k$ , что  $k \cdot 564 = d$ . Попробуем подобрать:  $2 \cdot 564 = 1128$ ,  $3 \cdot 564 = 1692$ ,  $4 \cdot 564 = 2256$ .

Ни на одно из получившихся чисел 2016 не делится, и дальше перебирать бессмысленно: числа не делятся на числа, бо́льшие себя.  
Вывод: Настя ошиблась.

**В.** Вторая подруга ошибается. Например, пусть  $a = 7, b = 6, c = 5$ . Тогда остаток от деления  $a$  на  $b$  равен 1, а остаток от деления 1 на  $c$  снова равен 1. С другой стороны, остаток от деления  $a$  на  $c$  равен 2.

**С.** Даны два числа  $b$  и  $c$ . Доказать, что для любого  $a$  выполнено  $(a \bmod b) \bmod c = a \bmod c$  тогда и только тогда, когда  $b$  делится на  $c$ .

Введём обозначения. Выпишем определение для деления с остатком  $a$  на  $b$ :  $a = k \cdot b + p$ , причём  $0 \leq p < b$ . То же для деления  $p$  на  $c$ :  $p = s \cdot c + q$  при  $0 \leq q < c$ . Произведём подстановку:  $a = k \cdot b + s \cdot c + q$ .

Если  $b$  делится на  $c$ , то существует такое  $t$ , что  $b = t \cdot c$ , то есть  $a = (k \cdot t + s) \cdot c + q$ , причём  $0 \leq q < c$ . Прямое утверждение доказано.

Обратное утверждение: равенство верно для любого  $a$  только тогда, когда  $b$  делится на  $c$ . Переформулируем: если  $b$  не делится на  $c$ , то равенство выполнено не для любого  $a$ . Давайте найдём такой  $a$  по данным  $b$  и  $c$ . Возьмём  $a = b$ , тогда левая часть  $(a \bmod b) \bmod c = 0$ , а правая —  $a \bmod c = b \bmod c \neq 0$ .

Отдельно заметим, что даже если  $b$  не делится на  $c$ , то при некоторых  $a$  (например,  $a = 0$ ) равенство из условия всё равно будет выполнено.

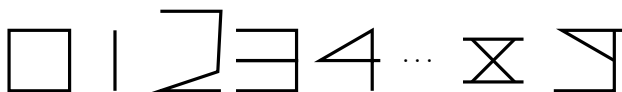
## Задача 4. Спички и пионеры

**А.** Ясно, что величина числа в десятичной записи в первую очередь зависит от количества его разрядов. Поэтому построим самое длинное число из самых «дешёвых» цифр: 1111111. У нас остаётся одна спичка: удлинить число мы уже не можем, остаётся только увеличивать цифры. Самая большая цифра из трёх спичек — 7, поэтому ответ на задачу — 7111111.

**В.** Да, вполне возможно, это были Аустри, Бримир, Вестри, Гандальв, Двалин, Ёрд, Ингви, Кили, Лит, Мотсогнир, Нии, Ори, Регин, Судри, Торин, Фили, Хефти, Эйкинскьяльди, Яри и Пётр.

**С.** Несколько неформальная задача, требовалось любое достаточно разумное рассуждение, например такое. Самая сложная цифра — 8.

Любая другая цифра может быть выложена упрощением её структуры (изъятием и частичным перекладыванием спичек). Чтобы выложить восьмёрку, нужно получить две замкнутые области. Самая простая фигура из прямых с замкнутой областью внутри — треугольник. Поэтому меньше трёх спичек никак не получится. Но из трёх спичек можно составить только один треугольник, поэтому четыре спички.



## Задача 5. Плохая компания

- А.** Не более трёх девочек. Докажем от противного: пусть их есть не меньше четырёх — тогда давайте возьмём этих четырёх и добавим к ним ещё кого-нибудь; получится что среди этих пятерых человек есть как минимум четыре девочки, что противоречит условию.
- В.** В стране не более 35 миллионов здоровых. Пусть их больше — хотя бы 35 миллионов и один человек. Тогда возьмём именно эту часть населения, и условие будет нарушено: в ней не будет ни одного носителя. Пожалуй, министр ошибается.
- С.** Если среди  $p$  человек есть  $q$  девочек, то в компании не более  $p - q$  мальчиков. Если их больше, то мы можем заменить девочек в данной выборке на мальчиков, в выборку не вошедших, и нарушить условие. Значит, в компании не менее  $N - (p - q)$  девочек.

Аналогично рассуждая, можем прийти к выводу, что у нас всего не более  $s - t$  не-блондинок, то есть не менее  $N - (p - q) - (s - t)$  блондинок.

## Задача 6. Эти необычные механизмы

- А.** Легко заметить, что шестерёнки, находящиеся в зацеплении, всегда вращаются в разных направлениях.  
(картинка)
- В.** В японских шахматах сёги есть фигура Золото, которая бьёт шесть клеток вокруг себя (закрашены серым на рисунке 2). Можно ли расставить на поле  $9 \times 9$  несколько таких фигур, чтобы каждая клетка поля билась ровно одним Золотом?

Это невозможно. Рассмотрим левый верхний угол доски. Если золото стоит на  $h1$  или  $h2$ , тогда поля  $i2$  ( $i3$ , соответственно) окажется не под боем: легко увидеть, что Золото, бьющее это поле, обязательно заденет и поле  $h2$  ( $h3$ , соответственно).

(картинка)

Если же золото стоит на  $i1$  или  $i2$ , то фигуры не «уложатся» вдоль доски: Золото должно далее стоять на  $f1$  ( $f2$ ), затем на  $c1$  ( $c2$ ), и поле  $a1$  окажется не под боем.

(картинка)

- С. Давайте вычислим: время на проезд  $n$  участков без остановки — это время на проезд первого участка со скоростью 54 км/ч, второго — со скоростью 48 км/ч, третьего — со скоростью 42 км/ч, и т.д. плюс время на ремонт колёс. Или, формулой (время выражено в минутах):

$$T(n) = \left( \frac{12}{54} + \frac{12}{48} + \dots + \frac{12}{60 - 6 \cdot n} \right) \cdot 60 + 10 + 3 \cdot n$$

Средняя скорость (в километрах в минуту), соответственно, будет равна расстоянию, поделённому на время, т.е.  $\frac{12 \cdot n}{T(n)}$ .

Теперь с конкретными цифрами:

Участки	Время на проезд	Средняя скорость
1	$\frac{12}{54} \cdot 60 + 13 = 26\frac{1}{3}$	$\frac{36}{79} \approx 0.456$
2	$\left( \frac{12}{54} + \frac{12}{48} \right) \cdot 60 + 16 = 44\frac{1}{3}$	$\frac{72}{133} \approx 0.541$
3	$\left( \frac{12}{54} + \frac{12}{48} + \frac{12}{42} \right) \cdot 60 + 19 = 64\frac{10}{21}$	$\frac{378}{677} \approx 0.558$
4	$\left( \frac{12}{54} + \frac{12}{48} + \frac{12}{42} + \frac{12}{36} \right) \cdot 60 + 22 = 87\frac{10}{21}$	$\frac{1008}{1837} \approx 0.549$

Итого, наиболее выгодная тактика — проезжать три участка, после чего заменять все потерянные колёса.

## Задачи 6 класса

### Задача 1. Падающие стулья

А. См. задачу ....

В. Потребуется  $n + m \cdot 3 - 2$  подпила минимум.



Предположим, что данного количества может не хватить, то есть существует схема подпила, при которой опасным будет только  $m - 1$  стул. Стул безопасен, если у него не более 1 подпила, то есть остальные  $n - m + 1$  стульев имеют  $n - m + 1$  подпилов в сумме максимум. Остаётся  $n + m \cdot 3 - 2 - n + m - 1 = m \cdot 4 - 3$  подпилов на  $m - 1$  стул, то есть какой-то стул будет иметь 5 подпилов, что невозможно.

Однако, если неудачно подпилить  $n + m \cdot 3 - 3$  ножек (у всех стульев по одной и у выбранного  $m - 1$  ещё три оставшихся), то такого количества подпилов может уже не хватить.

### С. Количество игр — $4 \cdot \dots$

- Если  $a_1 = a_2 = 0$ , то в игре будет ничья: каждый мальчик, оказавшись перед перспективой проигрыша, будет воздерживаться от подпила.
- Если  $a_1 > 0$  и  $a_2 = 0$ , то выигрывает Вася, если же наоборот,  $a_1 = 0$  и  $a_2 > 0$ , то выигрывает Петя: мальчик, не имеющий возможности пропустить ход, будет вынужден в какой-то момент подпилить у какого-то стула вторую ножку.
- Если  $n + 1$  делится на  $b_2$ , то выигрышная тактика есть у Васи: на любой ход Пети отвечать

Поскольку перепиливания не выгодны никому из игроков, первый стул упадёт при  $n + 1$  перепиливании — у каждого стула по ножке, и какая-то ножка у следующего

–

В кафе  $n$  четырёхногих стульев. Стул падает, если у него меньше трёх целых ножек. У мальчиков Васи и Пети есть две пилы, и они изобретают себе игру. Мальчики уже сошлись на том, что первым ходит Петя, а проигрывает тот, после чьего хода упадёт первый стул. Осталось выбрать возможное число перепиливаний за ход для каждого из них. Пусть за каждый ход Петя перепиливает не менее чем  $a_1$  и не более чем  $b_1$  ножек, Вася — от  $a_2$  до  $b_2$  ножек. Числа  $a_1$  и  $a_2$  могут быть равны нулю или единице, а числа  $b_1$  и  $b_2 = m$  или  $m - 1$ ,  $m < n$ , но при этом обязательно  $b_1 \neq b_2$ . Сколько игр удовлетворяют этим условиям, и кто из мальчиков выигрывает в каждой из них?

## Задача 2. Детский сад

- А.** В детском саду 10 детей рисуют 10 рисунков за 20 минут. Как долго 50 детей будут рисовать 50 рисунков? Как долго  $d$  детей будут рисовать  $r$  рисунков?

10 детей рисуют 10 рисунков за 20 минут — то есть каждый из детей рисует один рисунок в течении 20 минут. 50 детей будут, соответственно, рисовать 50 рисунков за те же 20 минут.  $d$  детей будут рисовать  $r$  рисунков за  $20 \cdot r \div d$  минут.

- В.** Детсадовцам Вове и Диме выдали по обручу — обруч представляет собой диск радиусом  $r_1$ , из которого вырезан круг радиуса  $r_2$ ,  $r_2 < r_1$ . Мальчики стали клеить пластилин на выданные им обручи. За минуту Вова наращивал сантиметр пластилина на внешнем краю обруча, а Дима — сантиметр пластилина на внутреннем его краю. У кого из мальчиков площадь обруча росла быстрее?

Площадь растёт быстрее у Вовы: например, потому, что длина внешней части обруча больше, а ширина полосы приклеяемого пластилина та же; значит, расход материала с внешней части будет выше.

Тот же результат можно показать с помощью формул для ширины круговой полосы, сравнив  $S_1 = \pi((r_1 + 1)^2 - r_1^2)$  и  $S_2 = \pi(r_2^2 - (r_2 - 1)^2)$ .

- С.** Всего возможно  $4! = 24$  варианта расположения детей по весу (мы должны переставить детей в правильном порядке и возможны все перестановки 4 элементов), поэтому будет требоваться не менее пяти взвешиваний (4 взвешивания дадут только  $2^4 = 16$  вариантов ответа, что недостаточно для выбора перестановки).

Покажем, что пяти взвешиваний достаточно.

Без уменьшения общности можем говорить не о детях, а о значениях их веса. Пусть задан список весов. Будем стремиться к тому, чтобы значения в нём были записаны по возрастанию веса. Рассмотрим операцию сравнения и обмена: сравним два указанных значения, и если они стоят в списке в неправильном порядке (т.е. значение идущего позже меньше значения идущего раньше) — поменяем местами.

Теперь выполним пять сравнений и обменов: 1 и 2, 3 и 4, 1 и 3, 2 и 4, 2 и 3.

Продemonстрируем работу данных сравнений на примере: пусть у детей был вес в килограммах (20, 25, 15, 10). Сравнение и обмен 1

и 2 не изменит список весов, после сравнения 3 и 4 мы получим (20, 25, 10, 15), сравнение 1 и 3 даст (10, 25, 20, 15), сравнение 2 и 4 даст (10, 15, 20, 25), сравнение 2 и 3 оставит список без изменений.

Почему это работает? После первых двух сравнений значения внутри пар 1,2 и 3,4 уже стоят в правильном порядке. Затем мы на третьем шагу выбираем общий минимум (сравнивая минимумы пар), на четвёртом — общий максимум. И на пятом шагу правильно составляем два оставшихся средних элемента.

### Задача 3. Числа, выписанные на доску

**А.** Число делится на 72 тогда и только тогда, когда делится на 8 и на 9. Поскольку  $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 = 45$ , любое число, составленное из этих цифр, делится на 9. Чтобы число делилось на 8, требуется, чтобы последние его три цифры как число делились на 8.

Чтобы число было минимальным, в его начале должны быть минимально возможные цифры. К сожалению, мы не можем ставить в первый разряд 0 (запись чисел с ведущими нулями не очень грамотная, а Коля — мальчик очень аккуратный), поэтому в первый разряд поставим следующую возможную цифру — 1. Остальные же цифры отсортируем по возрастанию. Мы получим

10012233445566778899

Это число нечётное, поэтому не делится на 8. Надо найти ближайшее к нему большее его, которое бы делилось.

По признаку делимости число  $\overline{abc}$  делится на 8, если  $4a + 2b + c$  делится на 8. Нетрудно видеть, что двух цифр 8 и нечётных 7 и 9 недостаточно для делимости: поскольку неизбежно  $c = 8$ , то и  $4a + 2b \div 8$ , значит,  $2a + b \div 4$ , то есть  $b \div 2$  и  $(a + b \div 2) \div 2$ . Поэтому, если  $b = c = 8$ , то  $a \div 2$ . Поэтому нам надо добавить ещё одну чётную цифру к рассмотрению, 6.

Какие числа, делящиеся на 8, можно собрать из одной шестёрки и цифр 8,8,9,9? Рассуждая аналогично предыдущему абзацу, построим таблицу:

Позиция 6	Последние 3 цифры	Всё число
$a = 6$	688	10012233445567799688
$b = 6$	968	10012233445567789968
$c = 6$	896	10012233445567789896

Из перечисленных вариантов выберем минимальный, это и будет ответ на задачу:

10012233445567789896

**В.** А Оля записала на доску числа от 1 до 121 и теперь занимается следующим: стирает с доски числа  $a$  и  $b$ , записывая вместо них разность вида  $a - 2b$  либо  $b - 2a$ . Могло ли в конце на доске остаться единственное число — ноль?

**С.** Пусть заданы числа  $a_1, \dots, a_n$ . Рассмотрим остатки от деления суммы начальных отрезков этих чисел на  $n$ :  $a_1 \bmod n$ ,  $(a_1 + a_2) \bmod n$ ,  $(a_1 + a_2 + a_3) \bmod n$  и т.д. Всего есть  $n$  таких отрезков, поэтому, возможно, все остатки будут различны. Если это так, тогда среди них обязательно будет остаток 0.

В противном случае обязательно какой-то из остатков повторится два раза:  $(a_1 + \dots + a_k) \bmod n = (a_1 + \dots + a_l) \bmod n$ ,  $k < l$ . Тогда неизбежно  $(a_{k+1} + \dots + a_l) \bmod n = 0$ .

## Задача 4. Линии и сетки

**А.** В стол вбиты 26 гвоздиков так, как показано на рисунке 5. Расстояние между соседними — 1 сантиметр. Помогите Любе пропустить по столу нитку длиной 25 сантиметров от гвоздика  $A$  к гвоздику  $B$  так, чтобы она касалась каждого гвоздика.

(картинка)

**В.** Легко заметить, что любая прямая, проведённая через прямоугольник, пересечёт не более  $a - 1$  вертикальных внутренних линий сетки и не более  $b - 1$  горизонтальных линий.

Представим, что мы идём вдоль прямой слева направо. Сперва мы попадаем в какую-то из клеток прямоугольника через его внешнюю границу, и каждое следующее горизонтальное или вертикальное пересечение даёт нам одну новую клетку на нашем пути — мы переходим в неё либо через правую сторону, либо через верхнюю/нижнюю. Если мы не пересекали углы клеток, то всего получится

$1 + (a - 1) + (b - 1)$  клеток на нашем пути: одна начальная,  $a - 1$  клеток при пересечении правой стороны и  $b - 1$  при пересечении верхней/нижней стороны. Если же мы пересекаем угол, количество клеток на пути будет ещё меньше — мы одновременно проходим и через горизонтальную и через вертикальную линию, без промежуточной клетки.

Таким образом, ответ — нет. Впрочем, если же мы ослабим условие и будем считать, что линия проходит по клетке если она даже только задевает границу клетки — то да, достаточно хотя бы раз задеть пересечение линий сетки (мы тогда сможем заявить, что побывали во всех четырёх клетках, соседних с пересечением).

- С. Среди треугольников с данным основанием  $l$  и данным периметром  $P$  найти треугольник с максимальной площадью.

Площадь треугольника — это полупроизведение основания на высоту. Основание фиксировано, а вот высота зависит от двух других сторон  $a$  и  $b$ . Начнём от ситуации, когда  $a = b = \frac{P-l}{2}$  — то есть треугольник равнобедренный. Если мы будем увеличивать, например,  $a$ , то  $b$  неизбежно придётся уменьшить, чтобы сохранить периметр. Соответственно, треугольник наклонится и сожмётся по высоте, площадь его уменьшится. Значит, наибольшая площадь будет при случае равнобедренного треугольника.

Теперь выразим это же более формально. Посчитаем площадь треугольника по формуле Герона. Для подсчёта нам требуется знать длину всех сторон, поэтому введём длину второй стороны  $a$  как параметр (третью сторону мы получим как  $P - (P - l - a) = l + a$ ):

$$S = \sqrt{\frac{P \cdot (P - a) \cdot (P - l) \cdot (l + a)}{4}}$$

Чтобы максимизировать  $S$ , мы можем менять только  $a$ . Формула монотонно зависит от всех компонентов произведения, а при изменении  $a$  меняются только  $P - a$  и  $l + a$ , поэтому вместо поиска точки максимума всей функции мы можем искать точку максимум только у  $(P - a) \cdot (l + a)$ .

Раскроем скобки:  $g(x) = -a^2 + (P - l)a + lP$ . Это квадратичная парабола, рога параболы направлены вниз, и потому максимум её, как известно, достигается в точке  $\frac{-(P-l)}{2 \cdot (-1)} = \frac{P-l}{2}$ .

Осталось посчитать ответ (шаги по преобразованию формулы опустим):  $S = \sqrt{\frac{P \cdot (P-1) \cdot (P+1)^2}{16}}$ .

## Задача 5. Разделение на подмножества

**А.** Могут, если в компаниях разное количество мальчиков: допустим, в первой компании десять мальчиков с 1 рублём, а во второй — пять мальчиков с 1 рублём.

**В.** Будем обозначать чёрный отрезок цифрой 1, а белый — 0, и пусть  $a_n$  — цвет отрезка прямой, содержащей точку  $n$ .

Покажем от противного, что Петя не сможет покрасить отрезки желаемым образом. Пусть ему это удалось. Заметим тогда, что при любом  $n$  выполнено  $a_n + a_{n+1} + a_{n+2} + a_{n+3} = 2$  и  $a_{n+1} + a_{n+2} + a_{n+3} + a_{n+4} = 2$ . Значит,  $a_n = a_{n+4}$ .

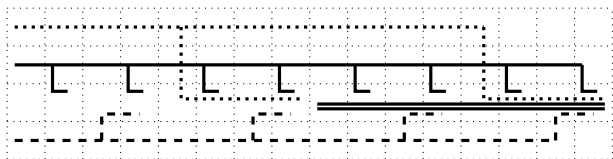
Возьмём такое  $n$ , что  $a_{n-1} = 0$  и  $a_n = 1$  (такое  $n$  существует, поскольку иначе начиная с некоторого места все отрезки покрашены одинаково, что невозможно). По этим данным однозначно вытекает, что  $a_{n+3} = 0$ . А вот  $a_{n+1}$  может быть разным. Рассмотрим два случая:

1.  $a_{n+1} = 1$ . Тогда  $a_{n+2} = 0$  и  $a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+11} = 1 + 0 + 0 + 1 + 1 + 0 + 0 + 1 + 1 + 0 + 0 = 5$ , противоречие.

2.  $a_{n+1} = 0$ . Тогда  $a_{n+2} = 1$  и  $a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+11} = 0 + 1 + 0 + 1 + 0 + 1 + 0 + 1 + 0 + 1 + 0 = 5$ , снова противоречие.

**С.** Рассмотрим некоторую клетку, и рассмотрим вопрос «водятся ли в клетке муравьи типа  $T$ ». Всего возможно четыре вопроса и ответы на вопрос не зависят друг от друга: мы можем ответить «да, да, нет, нет», можем «нет, нет, да, нет», и вообще, любая комбинация возможна. Итого, получается  $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$  вариантов.

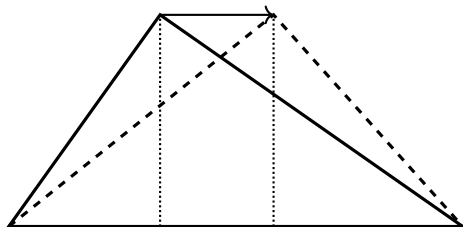
Пример расселения муравьёв, в котором реализуются все комбинации, приведён ниже. Каждый тип линии соответствует какому-то типу муравьёв; если линия проходит через клетку, то данная клетка принадлежит ареалу.



## Задача 6. Лыжная секция

А. Зададим себе уточняющий вопрос: в какой день в секции станет ровно 12 участников? На второй день рано: мы можем получить максимально  $1 + 5 + 5 = 11$  участников, если каждый день приходит по пятеро. На третий уже поздно: минимально получится  $1 + 4 + 4 + 4 = 13$  участников. Поэтому ровно 12 участников в секции не могло быть ни в какой день.

В. Рассмотрим треугольник, образованный отрезками, соединяющими текущее положение лыжников.



При соблюдении правил перемещения его площадь всегда постоянна: если принять отрезок, соединяющий двух стоящих лыжников, за основание треугольника, то перемещения третьего лыжника не меняют его высоту. Посчитаем площадь итогового треугольника (нетрудно видеть, что он прямоугольный):

$$\frac{90 \cdot 120}{2}$$

Однако, площадь исходного треугольника явно меньше:

$$\frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 100\right) \cdot 100}{2} < \frac{(0.9 \cdot 100) \cdot 100}{2} < \frac{90 \cdot 120}{2}$$

Значит, правила перемещения в какой-то момент были нарушены.

С. Возможны два сценария, в результате которых лыжник возвращается на своё место: «локальный» (если лыжник №1 обогнал лыжника №2, а потом лыжник №2 обогнал лыжника №1) и «глобальный» (лыжник №1 обогнал всех и вернулся на своё место, имея круг в запасе).

При «локальном» сценарии количество обгонов всегда чётное (всех, кого вы обогнали, вы должны пропустить вперёд). При «глобаль-

ном» сценарии, когда лыжник обгоняет своих остальных 563 товарищей, возможно нечётное количество обгонов. Если же в гонке участвует 563 лыжника, то оба сценария предполагают чётное количество обгонов.

При необходимости более формально данный результат можно доказать, переведя его на язык перестановок. Будем записывать положение лыжников, как  $n$ -элементную перестановку начального положения. При этом, поскольку гонка кольцевая и положение лыжников можно начать отсчитывать с любого места, то мы отождествляем между собой циклические сдвиги перестановок:

$$\text{если } \sigma(x) = (\tau(x) + k) \bmod n + 1, \text{ то } \sigma \equiv \tau$$

Если  $n = 564$ , то циклический сдвиг позволяет сделать из чётной перестановки нечётную. Однако, если  $n = 563$ , то сдвиг всегда сохраняет чётность. А раз к тому же исходная и целевая перестановки — чётные, то и количество транспозиций неизбежно будет чётным.

## Задача 7. В поисках чисел

**А.** Первый ребус. Справа число РОМАШКА — в нём 7 знаков, оно не меньше 1000000. Слева, в произведении, 6 различных цифр, одна цифра повторяется два раза, значит, максимальное значение этого выражения  $9 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4 = 544320$ . Данный ребус не имеет решений.

Второй ребус. Заметим, что  $\text{УРАУРА} = 1001 \cdot \text{УРА}$ , однако  $1001 = 11 \cdot 91$ . Число 11 простое, но в левой части равенства все числа — одноразрядные, поэтому левая часть на 11 не делится. Значит, и этот ребус не имеет решений.

**В.** Поскольку групп всего 4, а чисел — 6, то либо найдётся группа с тремя числами, либо две группы будут содержать по два числа. В первом случае заметим, что произведение трёх минимальных чисел из диапазона от 3 до 8 равно 60. Во втором случае выберем ту группу, в которой нет числа 3: произведение её элементов как минимум  $4 \cdot 5 = 20$ .

**С.** Для данного числа  $n$  предъявите алгоритм нахождения наименьшего составного числа  $N$  такого, что  $n!$  не делится на  $N$ , и докажите, что полученное составное число действительно будет наименьшим.



## Задача 8. Числа, цифры и приключения

- А. Стоимость спички в листочках при использовании в процессе оплаты некоторой цифры — это значение данной цифры, поделённое на количество спичек в ней. Давайте посчитаем эти значения:

$$\begin{array}{cccccccccc} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \hline 6 & 2 & 5 & 5 & 4 & 5 & 6 & 3 & 7 & 6 \end{array}$$

Очевидно, самая выгодная цифра — 0 (можно получить спички бесплатно), однако, если отбросить данный вариант как жульнический, то стоит остановиться на цифре 2, которой соответствует самое маленькое ненулевое число из ряда выше.

- В.  $953 = 32 \cdot 29 + 25$ . То есть, за один проход по экватору гусеница сделает 32 оборота и ещё сдвинется на 25 секций в ходе 33 оборота. Исходя из этого, номер секции на линии старта после  $k$  оборотов можно выразить как  $(k \cdot 25) \bmod 29$ . Поскольку 29 и 25 взаимно просты, то за 29 оборотов каждая из секций по разу побывает на линии старта.

То же касается и свежеставленной секции: она также будет оканчиваться на линии старта раз в 29 оборотов.

- С. Этот способ получения простых не работает уже с 6 простым числом:  $2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 + 1 = 30031 = 59 \cdot 509$ .

## Задачи 7 класса

### Задача 1. Деление и остатки

Смотреть задачу 3 варианта 5 класса.

### Задача 2. Пятница

- А. Перепишем условие формально: Если  $x$  — количество молока в миллилитрах в обычной кружке, то за первый раз мама разлила  $4 \cdot x + 1.2 \cdot x$  миллилитров — и это 30% от двух литров. Давайте тогда составим уравнение:

$$4 \cdot x + 1.2 \cdot x = 0.3 \cdot 2000$$

Легко видеть, что  $x = \frac{600}{5.2} = 115.38\dots$ , и искомая 20% разница составила чуть больше 23 миллилитров.

- В.** Представим, что Исинбай бежит с обычной человеческой скоростью  $v$ , за ним бежит тигр в  $q$  раз быстрее, со скоростью  $qv$ . За  $t$  секунд Исинбай пробежит расстояние  $vt$ , тигр —  $qvt$ , поэтому Исинбай никогда не должен подходить к тигру ближе, чем на  $(q - 1)vt$  метров, иначе тигр его успеет догнать за один приём, не отдыхая. Обычный человек бежит короткую дистанцию со скоростью примерно 30, или 8.(3), что даёт оценку  $x = 8.(3) \cdot (q - 1)t$  метров для безопасного расстояния.

Отрицательный  $x$  означает, что тигр бежит медленнее человека, и потому к нему можно безопасно подходить практически вплотную.

- С.** Для задания каждой расстановки мы должны выбрать пять пятниц для Дани и три для Кости.

У Дани всего есть  $C_7^5 = 21$  вариант иметь пять пятниц на неделе. В каждом из вариантов для Кости нужно выбрать из пяти Даниных пятниц две ( $C_5^2 = 10$ ), и из двух не-пятниц одну ( $C_2^1 = 2$ ). Итого, всего есть  $21 \cdot 10 \cdot 2 = 420$  расстановок пятниц.

### Задача 3. Эксперименты с клавиатурой

- А.** Для набора одиночного символа А. должен нажать несколько раз клавишу с символом, и, после этого, несколько раз Backspace. В итоге на экране должен остаться один символ:  $1 = x \cdot 5 - y \cdot 8$ . Из данного уравнения видно, что  $y = \frac{x \cdot 5 - 1}{8}$ .

Поскольку  $y$  монотонно возрастает с ростом  $x$ , нам достаточно найти такой минимальный положительный целый  $x$ , что  $y$  будет целым и неотрицательным. Если  $x = 1$ , то  $y = 0.5$ , не подходит (мы не можем нажать клавишу наполовину).  $x = 2$  даёт  $y = 1.125$ ,  $x = 3$  даёт  $y = 1.75$ ,  $x = 4$  даёт  $y = 2.375$ , и  $x = 5$  даёт  $y = 3$ . То есть, для набора одного символа А. нужно 8 нажатий на клавиатуре: пять раз нажать символ и три раза — Backspace.

Аналогично, для Б.  $y = \frac{x \cdot 7 - 1}{4}$ , и минимальный подходящий  $x$  равен 3, при этом Б. для набора символа требуется 7 нажатий на клавиатуре.

Поэтому обычно Б. будет печатать несколько быстрее, чем А., хотя в особых случаях (скажем, в случае текста, в котором каждая буква

повторяется по пппппяаяяятттттьььь раз подряд) преимущество будет у А.

- В.** АБВГДЕЖЗ — эту строчку А. печатает за 2 секунды (8 букв и два раза Caps Lock), Б. же печатает её за 4 секунды.

Обратный вариант невозможен: если А. будет даже дважды нажимать Caps Lock для ввода каждой заглавной буквы, его скорость ввода будет две буквы за 1.2 секунды (6 нажатий на 2 буквы). Б., в свою очередь, печатает две буквы за 1 секунду. То есть разность в скорости печати — 1.2 раза в худшем случае, что значительно меньше требуемых 2 раз.

- С.** В данных условиях всё, что мы можем — нажать четыре клавиши в каком-то порядке за секунду, после этих нажатий на экране появится буква. Всего возможно  $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2$  комбинаций, что даёт возможность выбрать одну из 16 букв за одну секунду. Однако, в русском 33 буквы, значит, какие-то из букв мы ввести не сможем. Если же какие-то 17 букв мы не будем различать (объединим в одну) — скажем, обозначим все буквы, начиная с О, как Щ, то мы как раз получим 16-буквенный алфавит: АБВГДЕЁЖЗИЙКЛМНЩ. Текст, кщнешщнщ, после такого изменения алфавита бщдещ выглядит нещбщщнщ.

## Задача 4. Факториалы

- А.** Егор посчитал факториал числа 33 и записал его на бумажку. Его сестра решила пошалить, и стёрла одну из цифр факториала. Получилась запись:

$$33! = 8'683'317'618'811'886'49\square'518'194'401'280'000'000$$

Помогите Егору восстановить стёртую цифру.

$33!$ , очевидно, делится на 9. Значит, сумма всех цифр числа должна делиться на 9. Если мы просуммируем все цифры числа, получим  $139 + \square$ . При этом, должны быть выполнены два условия:  $(139 + \square) \bmod 9 = 0$  и  $\square \leq 9$

Перебрав все 10 вариантов для  $\square$ , можем убедиться, что единственный подходящий из них — 8.

- В.** Воспользуемся двумя признаками делимости: на 9 и на 11 (на оба эти числа делится  $n!$ , если  $n \geq 12$ ). В большинстве случаев признака делимости на 9 хватит и мы можем восстановить стёртую цифру аналогично пункту А данной задачи. Однако, если сумма известных

цифр числа делится на 9, то возможны два варианта для стёртой цифры: 0 и 9.

В этом случае воспользуемся признаком делимости на 11: просуммируем значения, стоящие на чётных местах, и значения, стоящие на нечётных местах. Если разница между суммами и так делится на 11, была стёрта цифра 0 (его добавление на место не поменяет делимости). В противном случае была стёрта цифра 9.

С. Перегруппируем исходное выражение:

$$1! \cdot 2! \cdot 3! \cdot \dots \cdot n! = (1! \cdot 1! \cdot 2) \cdot (3! \cdot 3! \cdot 4) \cdot \dots \cdot ((n-1)! \cdot (n-1)! \cdot n)$$

И ещё раз:

$$\underbrace{1!^2 \cdot 3!^2 \cdot \dots \cdot (n-1)!^2}_{\text{квадрат целого}} \cdot \underbrace{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot n}_s$$

Рассмотрим внимательнее подвыражение  $s$ :

$$s = 2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (n-2) \cdot n = 2^{\frac{n}{2}} \cdot \left(\frac{n}{2}\right)!$$

Поскольку  $n$  кратно четырём (существует  $t$ , что  $n = 4 \cdot t$ ), то  $2^{\frac{n}{2}} = (2^t)^2$ .

Значит, нужно вычеркнуть факториал  $\frac{n}{2}$ , это единственный сомножитель, не являющийся полным квадратом.

## Задача 5. Ох уж эти школьницы!

А. Разложим 22887 на сомножители (попробуем понять, где Арина поставила знаки умножения). Число делится на 9 (т.к. сумма цифр 27), и частное равно 2543 — числу, выглядящему, как четыре оценки, записанные подряд.

Более тщательная проверка покажет, что это действительно простое число (нам надо проверять его делимость на простые числа, не превосходящие 53, состоящие только из цифр 1, 2, 3, 4 и 5, таких немного), то есть у Арины получилась формула  $2543 \cdot 3 \cdot 3$  (с точностью до перестановки сомножителей).

Теперь осталось посчитать средний балл:  $3\frac{1}{3}$ .

- В. Пусть Ольга придумала числа  $p$  и  $q$ , и пусть для определённости  $p > q$ . Введём новую переменную  $t = p - q$ . Тогда  $p^2 - q^2 = (q + t)^2 - q^2 = t^2 + 2qt = t(t + 2q)$ .

Из условия мы знаем, что  $p^2 - q^2 = 3476$ , разложим на множители:  $3476 = 2 \cdot 2 \cdot 11 \cdot 79$ . Нужно теперь эти множители распределить между  $t$  и  $t + 2q$ .

Заметим, что  $t$  не может быть максимальным сомножителем. Кроме того, поскольку  $t$  обязательно должен быть чётным (иначе всё произведение нечётно), то и выражение  $t + 2q$  тоже должно быть чётным. Эти требования дают нам единственное решение:  $t = 22$  и  $t + 2q = 2 \cdot 79$ , отсюда  $q = 68$  и  $p = 90$ .

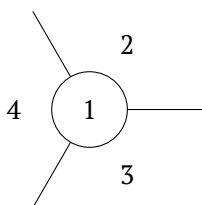
- С. Вычислим разность двух чисел пары:

$$\overline{abcde} - \overline{bcdea} = 10000 \cdot a + \overline{bcde} - 10 \cdot \overline{bcde} - a = 9999 \cdot a - 9 \cdot \overline{bcde}$$

Поскольку  $9999 \bmod 41 = 36$ , то мы легко подберём числа, при которых правило нарушается. Например, возьмём  $a = b = 1, c = d = e = 0$ . Тогда  $11000 \bmod 41 = 12$  и  $10001 \bmod 41 = 38$ .

## Задача 6. Очень умные муравьи

- А. Муравьи могли бы разделить плоскость так:

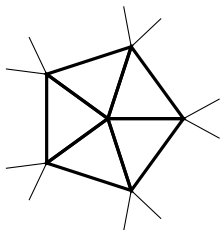


- В. Ответ на задачу зависит от того, какую точку мы считаем началом восхождения. Давайте считать, что муравьи совершают восхождение из внутреннего объёма коробки, из самого её центра. Тогда расстояние от центра до середины стенки равно 0.5 метра, расстояние от середины стенки до угла коробки по теореме Пифагора равно  $\sqrt{0.5^2 + 0.5^2}$ , и расстояние от центра коробки до угла по той же теореме

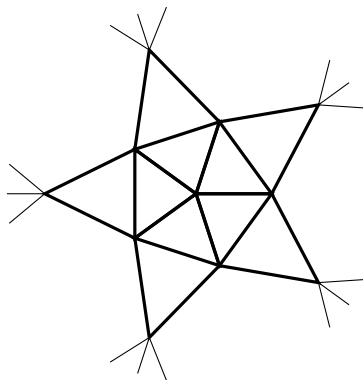
$$\sqrt{(0.5^2 + 0.5^2) + 0.5^2} \approx 0.866$$

Поскольку муравьи в 1000 раз короче людей, нам нужно увеличить все размеры в 1000 раз — и мы получим высоту холма чуть больше 866 метров.

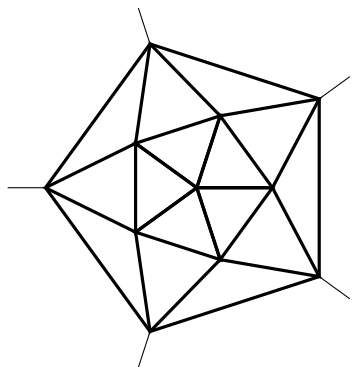
- С. Рассмотрим какую-нибудь вершину сетки. Из неё выходит пять отрезков, причём эти отрезки — стороны пяти треугольников, касающихся данной вершины.



Отрезки, выходящие из вершин, соединённых стороной треугольника, обязаны соединяться — иначе к треугольнику будет прилежать не другой треугольник, а более сложная фигура.



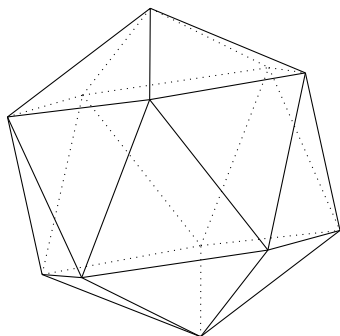
В свою очередь, отрезки, выходящие из вершин, соединённых общей двузвенной ломаной, должны совпадать — иначе в сетке появятся многоугольники с числом вершин, большим трёх.



И снова, все отрезки, выходящие из вершин, соединённых стороной, должны соединяться. Заметим, что точка соединения — общая для 1 и 2 отрезка, 2 и 3 отрезка, и т.п., поэтому она общая для всех отрезков. Из неё будет выходить 5 отрезков, значит, мы не можем больше добавить ни одной вершины к нашей сетке.

Всё шаги по построению сетки были вынужденными, и у нас получилась конечная сетка. А поскольку муравьёв счётное количество, им нужно счётное количество треугольников. Поэтому ответ на вопрос задачи отрицательный.

Дополнительно заметим, что структура из треугольников, которая получилась — это структура икосаэдра, одного из пяти правильных многогранников.



## Задача 7. Несправедливый турнир

- А. Нет, поскольку самый слабый участник всегда проигрывает свою встречу. Значит, он всегда будет оказываться в худшей группе, с кем бы ни играл. В итоге, он окажется внизу таблицы.

**В.** Введём определение: если  $N$ . сызязается сильнее некоторого другого участника, то мы назовём того участника «слабым», если слабее — назовём его «сильным». Исходно имеется не более  $2^{t-1} - 2$  сильных участников.

Чтобы оказаться в финале с аутсайдером,  $N$ . должен проиграть все встречи, кроме последней. Значит, в первой встрече  $N$ . должен встречаться с сильным. Вместе с  $N$ . в группе проигравших окажется не более  $\frac{2^{t-1}-2}{2} - 1 = 2^{t-2} - 2$  сильных участников: сильный может проиграть только сильному, всего  $\frac{2^{t-1}-2}{2}$  пар, но одну из пар сильных мы обязаны разорвать, чтобы  $N$ . проиграл.

Повторив рассуждение можно вывести общую формулу: после раунда  $k$  в группе проигравших всего может остаться не более  $2^{t-k-1} - 2$  сильных. Значит, после раунда  $t - 2$  сильных не останется и  $N$ . избежит встречи с аутсайдером, выиграв в раунде  $t - 1$ .

**С.** Введём определения аналогично предыдущему пункту: если  $N$ . сызязается сильнее некоторого другого участника, то мы назовём того участника «слабым», если слабее — назовём его «сильным». Исходно есть не менее  $2^{t-1}$  сильных.

Пусть в первом туре  $N$ . соревнуется с сильным и все остальные сильные соревнуются в паре с другими сильными, тогда после раунда в группе проигравших останется не менее  $2^{t-2} - 1$  сильных. Во втором раунде мы снова составим пару  $N$ . с сильным, добавим не меньше  $\frac{2^{t-2}-2}{2} = 2^{t-3} - 1$  пар сильных, и после второго раунда в группе проигравших останется  $N$  и не меньше  $2^{t-3} - 1$  сильных. Повторив это построение пар  $k$  раз мы получим, что после  $k$  раунда в группе проигравших останется  $N$ . и не меньше  $2^{t-k-1} - 1$  сильных.

Итак,  $N$ . после  $t - 1$  раунда окажется в проигравшей все раунды группе. А вторым участником этой группы будет самый слабый участник соревнования: ведь все остальные участники, кроме этих двоих, смогли выиграть хоть у кого-то.

Для точности заметим, что условие неявно предполагает, что аутсайдер и  $N$ . — это разные участники. Если же такого требования нет, то мы сможем утверждать только об участии  $N$ . в сызязании за последнее и предпоследнее места.

## Задача 8. Дело-то житейское

**А.** См. ранее...



**В.** По принципу Дирихле нельзя рассадить  $n$  кроликов в  $n - 1$  клетку так, чтобы в каждой клетке оказалось ровно по кролику. Мы будем раскладывать по  $n - 1$  ящикам  $n$  сайтов, и в ящик номер  $k$  мы будем класть сайт, у которого  $k$  ссылок на другие сайты. Принцип Дирихле докажет требуемое.

**С.** Заметим, что максимально в строке имеется 4 промежутка между закрашенными цифрами (промежуток — число — промежуток — число — промежуток — число — промежуток). С другой стороны, минимально в строке  $9 + 19 \cdot 2 = 47$  символов и максимально может быть закрашено  $3 \cdot 2 = 6$  цифр. То есть, минимальная длина промежутка  $41 \div 4 > 10$  символов, значит, одноразрядное число может быть закрашено только если это число 1.

Пусть же число 1 не закрашено. Тогда заметим, что длина промежутка до первой закрашенной цифры — нечётна ( $9 + x \cdot 2$ ), но длина промежутка между первым и вторым закрашенным числом — чётна.

Значит, закразка возможна только если число 1 закрашено. Для завершённости приведём корректный пример такой закраски:

1234567891011121314151617181920212223242526272829

## Задача 9. День, когда Стёпа всё испортил

**А.** Стёпа, например, мог бы попробовать посчитать в двоичной системе: согнутый палец означает 0, распрямлённый означает 1. Всего десять пальцев, поэтому самое большое число, которое можно показать так, равно  $2^{10} - 1 = 1023$ .

Хотя, конечно, данный совет — это только самое начало дела. Показ некоторых комбинаций (скажем, числа 0101001010<sub>2</sub> — распрямлены безымянный и указательный пальцы на обеих руках) может потребовать тренировки.

**В.** (косяк в условии) ... Стёпа покрутил какой-то рычажок, после чего при взвешивании они всегда показывают вес, отличающийся от настоящего на постоянное значение  $w_0$ . При этом Стёпа не знает значение  $w_0$ , потому он не знает, как надо подкрутить рычажок для исправления ситуации. Если ничего не взвешивать, то весы показывают 0 всё равно. ...

Весы Всезнамуса после вмешательства Стёпы показывают всегда на  $w_0$  больше, надо определить  $w_0$ . Взвесив бутылку воды получим  $r_1 = w_1 + w_0$ , взвесив кусок циркония получим  $r_2 = w_2 + w_0$ , взвесив оба предмета получим  $r_{12} = w_1 + w_2 + w_0$ . Давайте теперь вычтем из двух первых результатов третий и получим желаемое:  $r_1 + r_2 - r_{12} = w_1 + w_0 + w_2 + w_0 - w_1 - w_2 - w_0 = w_0$ .

- С. к условию: (скорость не изменяется по абсолютному значению, но направлена параллельно земле)

Стёпа, падая с высоты  $h$ , падает равноускоренно. За время падения  $t$  Стёпа пролетит  $\frac{at^2}{2}$  метров, где  $a$  — ускорение свободного падения в мире игры Portal, причём  $\frac{at^2}{2} = h$ . Отсюда  $t = \sqrt{\frac{2h}{a}}$  и вертикальная скорость у земли  $v_{\downarrow} = \sqrt{2ah}$ .

После прохождения через портал он летит горизонтально с данной скоростью, но вертикальная скорость снова равна 0, поэтому Стёпа снова наберёт  $v_{\downarrow}$  вертикальной скорости, и итоговая скорость будет  $\sqrt{v_{\downarrow}^2 + v_{\downarrow}^2}$ . И вообще, после  $n$  прыжков итоговая скорость будет  $\sqrt{n \cdot v_{\downarrow}^2}$ .

Соответственно, нижний портал в ходе  $n + 1$  прыжка окажется на расстоянии  $h \cdot \sqrt{n \cdot v_{\downarrow}^2}$  от стены, то есть будет удаляться всё с меньшим и меньшим шагом, пропорционально  $\sqrt{n}$ .

## Задача 10. Хитрый Миша

- А. Посетители тира ведут огонь из вершины  $X$  равнобедренного треугольника  $XAB$  по его основанию  $AB$ . Заметим, что отрезок  $XP$ , соединяющий вершину с точкой попадания пули на основании треугольника  $P$ , делит треугольник на два других,  $XAP$  и  $XBP$ . Площадь же этих треугольников равна полупроизведению оснований на расстояния от пулевой дырки до соответствующих прямых  $h_A$  и  $h_B$ :

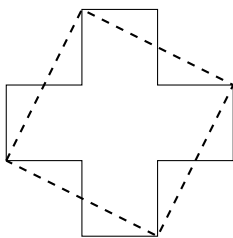
$$S(XAP) = \frac{|XA| \cdot h_A}{2} \quad S(XBP) = \frac{|XB| \cdot h_B}{2}$$

Однако, поскольку  $|XA| = |XB|$ , имеем

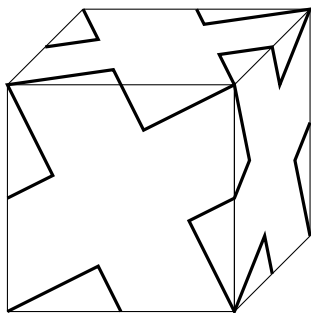
$$S(XAB) = S(XAP) + S(XBP) = \frac{|XA| \cdot h_A + |XB| \cdot h_B}{2} = |XA| \cdot (h_A + h_B)$$

Площадь треугольника  $XAB$  и длина боковых сторон не зависит от выбора  $P$ , значит, и  $h_A + h_B$  тоже не зависит от выбора  $P$ . Поэтому, если следовать предложению Миши, награждать придётся всех посетителей тира.

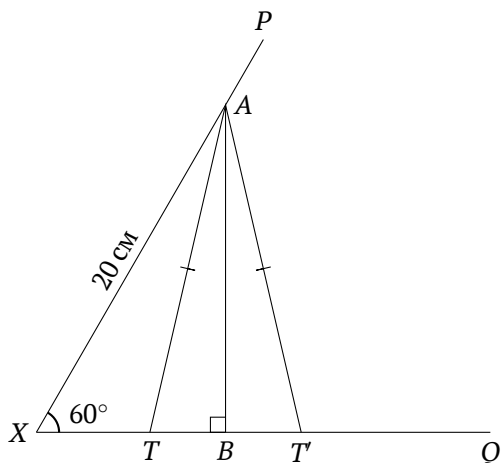
- В.** Будем заклеивать куб со стороной  $\sqrt{5}$  крестиками, сопоставляя одному из шести крестиков одну из шести граней кубика. Будем приклеивать крестик к квадратной грани «под наклоном»:



Тогда, загибая уголки у крестиков, получим заклеивание кубика:



- С.** Построим чертёж. Искомое расстояние  $t = |XT|$ . Так как  $|AT| = |AT'|$ , то треугольник  $TAT'$  — равнобедренный. Если посередине между  $T$  и  $T'$  отметить ещё одну точку,  $B$ , то треугольник  $XAB$  будет прямоугольным (т.к. высота и медиана к основанию в равнобедренном треугольнике совпадают). Значит,  $\angle XAB = 30^\circ$ , отсюда  $|XB| = \frac{|XA|}{2} = 10$  см. Значит,  $t = 8$  см.



## Задачи 8 класса

### Задача 1. Числа и суммы

Смотреть задачу 2 варианта 5 класса.

### Задача 2. Детский сад

Смотреть задачу 2 варианта 6 класса.

### Задача 3. Факториалы

Смотреть задачу 4 варианта 7 класса.

### Задача 4. В поисках чисел

Смотреть задачу 7 варианта 6 класса.

### Задача 5. Проблемы завуча

А. Средний рост в параллели:  $\frac{161+162+\dots+220}{60} = \frac{361 \cdot 30}{60} = 190.5$ , обозначим его за А.

Обозначим сумму ростов школьников в классе  $i$  как  $H_i$ . Покажем, что максимальный минимальный средний рост школьников достигается, когда  $H_1 = H_2 = H_3$ : в этом случае, очевидно,  $\frac{H_i}{20} = A$ . Покажем это в два приёма: во-первых, продемонстрируем, что максимальный минимальный средний рост не превышает  $A$ , а потом покажем, что  $A$  достигим.

Пусть есть два класса, в которых средний рост различается, и пусть  $H_1 < H_2 \leq H_3$ . Тогда минимальный средний рост ниже  $A$ :

$$A = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{60} > \frac{3H_1}{60} = \frac{H_1}{20}$$

Теперь покажем достижимость  $A$ : построим пример такого разбиения на классы, что  $H_1 = H_2 = H_3$ .

Класс	Состав класса: рост учеников
1	181, 182 ... 200
2	171, 172 ... 179, 201, 202 ... 210
3	161, 162 ... 169, 211, 212 ... 220

- В.** Монета пролезет, если найдутся такая проекция монеты и такая деформация листа с отверстием, что монета может быть размещена целиком внутри деформированного отверстия. Так как монета круглая, то любая проекция содержит отрезок длины  $2r$ . С другой стороны, проекция ребра ничего кроме этого отрезка и не содержит. Отсюда вывод: монета пролезет тогда и только тогда, когда в отверстие помещается отрезок длины  $2r$ .

Давайте найдём наиболее выгодную деформацию. Поскольку лист очень гибкий, мы можем изменить форму отверстия, сохранив периметр. Давайте отверстие вытягивать, в пределе получив прямую узкую щель длины  $\pi R$ ; это самая длинная фигура с требуемым периметром, однако, она нас по-прежнему устраивает.

Чтобы монета пролезла, нужно, чтобы длина щели равнялась диаметру монеты. Отсюда,  $R = \frac{2r}{\pi}$ .

- С.** Теперь у завуча есть лист совершенно не гибкого стекла, также с вырезанным в нём круглым отверстием радиуса  $r$ . Какую длину должно иметь ребро очень шершавого куба, чтобы он не пролезал через это отверстие?

Если мы имеем возможность вращать куб, то нам нужно найти его проекцию с самым маленьким радиусом описанной окружности.

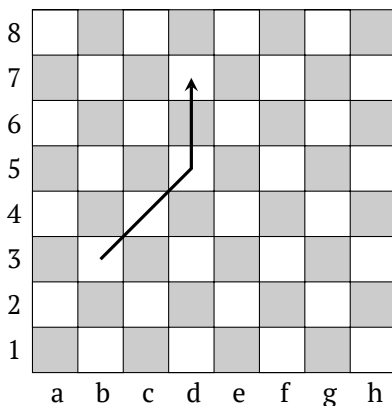
## Задача 6. Фигуры в шахматах

**А.** Для определённости будем учитывать в общем количестве пройденных клеток начальные и конечные клетки.

Ферзь путешествует с поля  $(a, b)$  на поле  $(c, d)$ . Рассмотрим разницу начальных и конечных координат. Пусть для определённости разницы в номере колонки не меньше, чем в номере строки ( $|a - c| \geq |b - d|$ ). Поскольку ферзь не прыгает через клетки, он должен пройти не меньше  $|a - c| + 1$  клетки (иначе окажется, что через какую-то вертикаль из находящихся между  $a$  и  $c$  он перепрыгнет, не побывав на ней).

Однако, если ферзь пройдёт по диагонали  $|b - d| + 1$  клеток, и оставшиеся  $|a - c| - |b - d|$  клеток пройдёт по горизонтали, то посетит в точности  $|a - c| + 1$  клетку. Поэтому ответ на задачу — максимум разниц координат плюс один:  $\max(|a - c|, |b - d|) + 1$ .

Ниже на картинке показан пример движения ферзя с поля **b3** на поле **d7**. Ферзь посетит на своём маршруте  $\max(|2 - 4|, |3 - 7|) + 1 = 5$  клеток.



**В.** Корблюд имеет четыре возможных хода, которые в процессе перемещения можно повторять сколько угодно раз. Давайте укажем для каждого хода Корблюда его *сдвиг* — координаты поля, в котором Корблюд окажется после хода, если изначально он стоит на поле  $(0, 0)$ :

Текстовое описание хода	Сдвиг
вправо и вверх	$(1, 3)$
вправо и вниз	$(1, -3)$
влево и вниз	$(-1, -2)$
влево и вверх	$(-1, 2)$

Несложно понять, что порядок ходов значения не имеет, и для итогового перемещения важно только количество ходов каждого типа.

Давайте введём обозначения для количества ходов Корблюда каждого типа ( $n_{\nearrow}$ ,  $n_{\searrow}$ ,  $n_{\swarrow}$  и  $n_{\nwarrow}$ ) и составим уравнение: Корблюд может сдвинуться на  $(p, q)$  клеток, если уравнение  $n_{\nearrow}(1, 3) + n_{\searrow}(1, -3) + n_{\swarrow}(-1, -2) + n_{\nwarrow}(-1, 2) = (p, q)$  имеет решение.

Подберём коэффициенты, позволяющие получить все возможные единичные сдвиги  $(0, 1)$ ,  $(0, -1)$ ,  $(1, 0)$  и  $(-1, 0)$ , это легко сделать простым перебором ходов:

Сдвиг	$n_{\nearrow}$	$n_{\searrow}$	$n_{\swarrow}$	$n_{\nwarrow}$
$(1, 0)$	3	1	3	0
$(-1, 0)$	1	3	0	3
$(0, 1)$	1	0	1	0
$(0, -1)$	0	1	0	1

Каким бы ни было перемещение, его можно всегда представить как комбинацию единичных сдвигов, которые, в свою очередь, можно представить как комбинацию ходов Корблюда. Значит, Корблюд может достигнуть любой клетки доски из любой.

Для решения второй части задачи выпишем сдвиги для ходов Корблюда Диагонального и попробуем, например, получить единичный сдвиг вверх, найдя решения уравнения:

$$n_{\nearrow}(1, 3) + n_{\searrow}(1, -2) + n_{\swarrow}(-1, -3) + n_{\nwarrow}(-1, 2) = (0, 1)$$

Преобразуем уравнение для координат в систему уравнений:

$$\begin{cases} (n_{\nearrow} - n_{\swarrow}) + (n_{\searrow} - n_{\nwarrow}) = 0 \\ 3 \cdot (n_{\nearrow} - n_{\swarrow}) - 2 \cdot (n_{\searrow} - n_{\nwarrow}) = 1 \end{cases}$$

Заменим  $n_{\nearrow} - n_{\swarrow}$  на  $x$  и  $n_{\searrow} - n_{\nwarrow}$  на  $y$ :

$$\begin{cases} x + y = 0 \\ 3x - 2y = 1 \end{cases}$$

То есть  $x = -y$ , отсюда  $5x = 1$ , а это уравнение не имеет решений в целых числах (мы должны сделать на 0.2 хода больше вправо и вверх, чем влево и вниз). Значит, и исходное уравнение не имеет решений, а потому и Корблюд Диагональный не сможет обойти всю доску.

Заметим, что если рассмотреть перемещение вверх на кратное 5 число клеток, то уравнение станет разрешимым ( $5x = 5$ ,  $x = 1$ ,  $y = -1$ ). Это возможно, например, при  $n_{\nearrow} = n_{\nwarrow} = 1$  и  $n_{\swarrow} = n_{\searrow} = 0$ : идём вправо и вверх, после чего влево и вверх. Но это будет решением уже какой-то другой задачи.

- С. Пусть нам дана фигура, имеющая четыре возможных хода. Выпишем эти ходы в порядке обхода по часовой стрелке, начиная с верхнего правого угла:  $(1, a), (1, -b), (-1, -c), (-1, d)$ , где  $a, b, c$  и  $d$  могут быть равны 2 или 3. Например, для Корблюда из пункта В это будет  $(1, 3), (1, -3), (-1, -2), (-1, 2)$ . Выпишем вертикальные сдвиги фигуры в строку (назовём эту строку *сигнатурой* фигуры):  $abcd$ . Скажем, Корблюд имеет сигнатуру 3322, а Диагональный корблюд — 3232. Всего таких строк 16, поэтому без учёта симметрии имеется 16 возможных фигур.

Однако, с учётом симметрии некоторые фигуры мы должны отождествить: а именно, все зеркально симметричные по горизонтали и вертикали. То есть, фигура  $abcd$ , отражённая по горизонтали — это  $badc$ , отражённая по вертикали — это  $dcba$ , отражённая и по горизонтали и по вертикали (центральная симметрия) —  $cdab$ .

С учётом этого подсчитаем количество фигур, сгруппировав их по количеству троек в сигнатурах и указав симметричные варианты для фигуры, если такие фигуры ранее не встречались:



тройки	фигура	симметрия		
		гориз.	верт.	центр.
0	2222			
1	3222	2322	2223	2232
2	3322		2233	
	3232	2323		
	2332	3223		
3	3332	3323	2333	3233
4	3333			

Как нетрудно заметить, всего получилось 7 различных фигур, остальные получаются с помощью симметрий.

*Фигуры 3322 и 3232* рассмотрены в пункте **В**, фигура 3322 позволяет обойти всё поле, а фигура 3232 — нет.

*Фигура 2332.* По своей идее она подобна фигуре 3322. Фигура 2332 «развёрнута» на  $90^\circ$  градусов относительно фигуры 3322, поэтому для неё легко получить единичные сдвиги вправо и влево, а сдвиги вверх и вниз получатся сложными:

Сдвиг	$n_{\nearrow}$	$n_{\searrow}$	$n_{\nwarrow}$	$n_{\swarrow}$
(1, 0)	1	0	0	1
(-1, 0)	0	1	1	0
(0, 1)	3	1	0	3
(0, -1)	0	1	1	0

*Фигуры 2222 и 3333.* В случае фигуры 2222 перемещение по вертикали всегда кратно 2, значит, клетки с нечётными вертикальными координатами будут нам недоступны. Аналогично, в случае фигуры 3333 недоступны клетки с координатами  $(x, y)$ , где  $y$  не кратен 3.

*Фигура 3222.* Единичные сдвиги  $(0, 1)$  и  $(-1, 0)$  получить легко, а вот сдвиги  $(0, -1)$  и  $(1, 0)$  заставляют задуматься. Вместо того, чтобы подбирать эти решения, давайте воспользуемся «тяжёлой артиллерией» — построим и решим соответствующие диофантовы уравнения.

Составим уравнение:  $n_{\nearrow}(1, 3) + n_{\searrow}(1, -2) + n_{\swarrow}(-1, -2) + n_{\nwarrow}(-1, 2) = (0, -1)$

Преобразуем:

$$\begin{cases} (n_{\nearrow} + (n_{\searrow} - n_{\nwarrow} - n_{\swarrow})) = 0 \\ 3 \cdot n_{\nearrow} - 2 \cdot (n_{\searrow} - n_{\nwarrow} + n_{\swarrow}) = -1 \end{cases}$$

Обозначим  $n_{\nearrow}$  за  $x$  и  $n_{\searrow} - n_{\nwarrow} + n_{\swarrow}$  за  $y$ . Рассмотрим уравнение  $3x - 2y = -1$ , выразим  $y$  из него:  $y = \frac{1+3x}{2}$ . Но нас устраивают не все такие  $y$ , а только целые. Значит,  $1 + 3x$  должно делиться на 2, то есть  $3x \bmod 2 = 1$ .

Легко видно, что  $x = 1$  удовлетворяет этому условию. Пусть ещё какой-то  $t$  удовлетворяет условию  $3t \bmod 2 = 1$ . Тогда  $3(x - t) \bmod 2 = 3x \bmod 2 - 3t \bmod 2 = 0$ , а поскольку 2 и 3 взаимнопросты, то  $(x - t) : 2$ . То есть, все значения, удовлетворяющие условию, строятся по правилу  $x = 2k + 1$ . Отсюда  $y = \frac{4+6k}{2} = 3k + 2$ .

Второе уравнение системы разрешено, подставим значения в первое уравнение:  $(2k + 1) + (3k + 2) - 2 \cdot n_{\swarrow} = 0$ . Решений у него много, давайте, например, возьмём  $k = 1$  и  $n_{\swarrow} = 4$ , и это приведёт к  $n_{\nearrow} = x = 3$ , а из  $n_{\searrow} - n_{\nwarrow} + 4 = y = 5$  можем взять  $n_{\searrow} = 1$  и  $n_{\nwarrow} = 0$ . И последнее уравнение:  $n_{\nearrow}(1, 3) + n_{\searrow}(1, -2) + n_{\swarrow}(-1, -2) + n_{\nwarrow}(-1, 2) = (1, 0)$ .

Здесь  $3x - 2y = 0$ , отчего  $x = 2k$ ,  $y = 3k$  и  $2k + 3k - 2 \cdot n_{\swarrow} = 1$  и если выбрать  $k = 1$ , то  $n_{\swarrow} = 2$ . Тогда  $n_{\nearrow} = x = 2$ , и из замены  $n_{\searrow} - n_{\nwarrow} + 2 = y = 3$  выберем  $n_{\searrow} = 1$  и  $n_{\nwarrow} = 0$ .

Сдвиг	$n_{\nearrow}$	$n_{\searrow}$	$n_{\swarrow}$	$n_{\nwarrow}$
(1, 0)	2	1	2	0
(0, -1)	3	1	4	0
(0, 1)	1	0	1	0
(-1, 0)	2	0	0	3

**Фигура 3332.** Попробуем здесь ещё один метод: сведём эту фигуру к фигуре 2332. Заметим, что  $(1, 3) + (1, -3) + (-1, 2) = (1, 2)$ , то есть последовательность из трёх ходов (вправо и вверх, вправо и вниз, влево и вверх) заменяет отсутствующий у нас ход  $(1, 2)$ . Остальные же ходы у 2332 и 3332 совпадают. Значит, любое перемещение 2332 доступно и для 3332.

**Итого:** четыре фигуры (3322, 2332, 3222 и 3332) могут обойти всё поле, а три оставшиеся (2222, 3333, 3232) не могут.

Отдельно заметим, что решение диофантовых уравнений — важная область алгебры, и, хотя для некоторых типов таких уравнений есть разработанные методы решения, в общем случае задача неразрешима. Вопрос о поиске общего метода решения был поставлен Гильбертом в 1900 году («10 проблема Гильберта»), и в 1970 году Юрий Матиясевич показал, что такого метода нет.

## **Задача 7. Пятница**

Смотреть задачу 2 варианта 7 класса.

## **Задача 8. Очень умные муравьи**

Смотреть задачу 6 варианта 7 класса.

## **Задача 9. Эксперименты с клавиатурой**

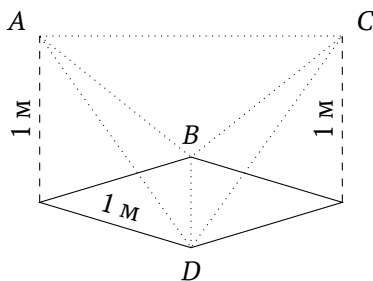
Смотреть задачу 3 варианта 7 класса.

## **Задача 10. Первым делом — самолёты**

**А.** Поскольку на стене установлен точечный источник света (лампа), лучи от него расходятся в стороны под некоторым углом. Поэтому тень от ближе расположенного к лампе объекта будет больше, чем от дальше расположенного (рассмотрим предельный случай: небольшую близко расположенную лампу можно закрыть ладонью целиком; от далеко расположенной ладонью можно разве что заслонить глаза).

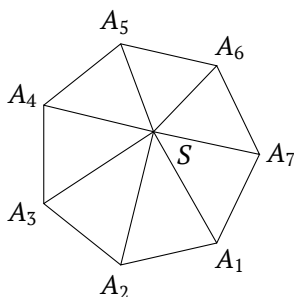
Если самолётик немного наклонить, то тень от более близкой к лампе части крыла будет больше, чем от более далёкой. Поэтому если тень от нижней части самолётика больше, то самолётик наклонён к лампе, а если тень от верхней части больше — самолётик наклонён от лампы.

**В.** Пока вертолёты стоят на земле, расстояние между противоположными вертолётами равно  $\sqrt{2}$ . Нам надо добиться, чтобы расстояние и между соседними составило  $\sqrt{2}$ .



Поднимем в воздух вертолёты  $A$  и  $C$  на высоту 1 метр. Теперь все вертолёты имеют попарные расстояния  $\sqrt{2}$ .

- С. Пусть  $S$  — точка посадки ракеты. Тогда площадь семиугольника равна сумме площадей треугольников, образованных точкой  $S$  и соседними вершинами семиугольника  $A_i$  и  $A_{i+1}$ .



Площадь треугольника  $SA_iA_{i+1}$  равна  $\frac{h_i \cdot 2 \text{ км}}{2} = h_i \text{ км}^2$ , где  $h_i$  — расстояние от  $S$  до прямой, продолжающей сторону семиугольника  $A_iA_{i+1}$ .

Отсюда можем сделать вывод, что сумма расстояний до прямых  $h_1 + h_2 + \dots + h_7$  численно равна площади семиугольника и потому постоянна.

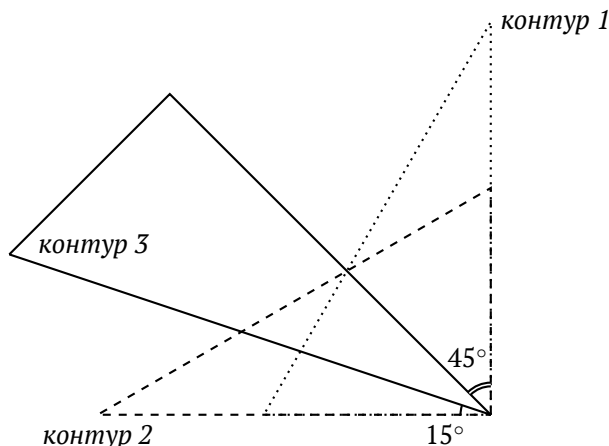
## Задача 11. Несправедливый турнир

Смотреть задачу 7 варианта 7 класса.

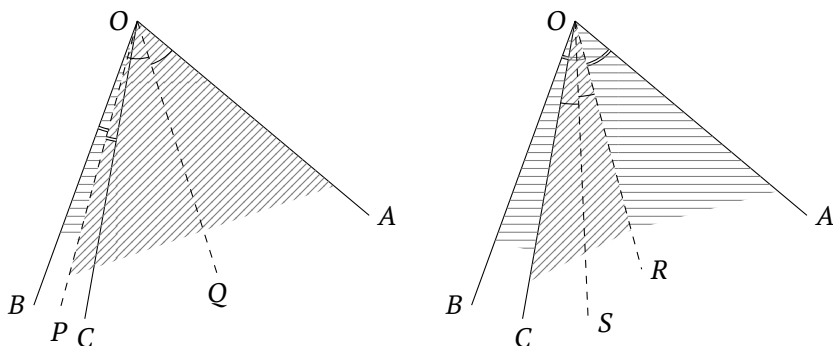
## Задача 12. Попытки осмысления биссектрис

- А. Обведём треугольник (контур 1), потом перевернём его и снова обведём (контур 2). Луч, исходящий из прямого угла, проходящий через пересечение контуров 1 и 2 — биссектриса прямого угла, деля-

щая его на два угла по  $45^\circ$ . Если приложить к этой биссектрисе треугольник (контур 3), то мы получим искомый  $15^\circ$  угол.



**В.** Данное определение биссектрисы зависит от выбора начальной грани. Рассмотрим пример, где различие очевидно. Дан трёхгранный угол, образованный гранями  $AOB$ ,  $AOC$  и  $BOC$ , причём угол  $BOC$  значительно меньше углов  $AOC$  и  $BOA$ . Если мы разобьём сперва плоский угол  $BOC$  биссектрисой  $OP$ , а потом построим биссектрису  $OQ$ , разбив угол  $AOQ$ , то она будет лежать почти в середине угла (левый рисунок). Противоположный порядок разбиения угла даст нам биссектрису  $OS$ , сильно смещённую к грани  $BOC$  (правый рисунок).



Чуть более формальное пояснение. Возьмём трёхгранный угол и будем уменьшать угол  $BOC$  до нуля. При очень маленьких значениях этого угла окажется, что биссектриса  $QO$  почти совпадает с биссектрисой угла  $AOB$ . Однако, угол  $SOC$  — только половина угла  $ROC$ , то есть примерно четверть угла  $AOB$ .

- С. В треугольнике  $MNK$  проведены биссектрисы углов  $N$  и  $K$ . Из оставшейся вершины на эти биссектрисы опустили перпендикуляры и провели прямую через их основания. Доказать, что она будет параллельна стороне  $NK$ .



# Задачи 2012 года

## Задачи 5 класса

### Задача 4.

**А.** Старуха Шапокляк очень любит животных. Все ее животные, кроме двух, — собаки, все, кроме двух, — кошки, и все, кроме двух, — попугаи, остальные — крыски. Сколько каких животных у старухи Шапокляк?

**Решение:** Пусть у Шапокляк  $s$  собак,  $c$  кошек,  $p$  попугаев и  $k$  крысок. Тогда

$$\begin{cases} c + p + k = 2 \\ s + p + k = 2 \\ s + c + k = 2 \end{cases}$$

Вычитая эти равенства друг из друга, можно получить, что  $s = c = p$ . Более того, эти три числа обязаны не превосходить 1, потому что иначе суммы в левой части равенств будут больше двух.

Первый случай:  $s = c = p = 0$ . Тогда у Шапокляк две крыски, а других животных нет. Второй случай:  $s = c = p = 1$ . Тогда у шапокляк одна собака, одна кошка и один попугай, а крыс нет.

Оба ответа являются верными — более того, для получения полного балла за задачу оба должны быть приведены.

**В.** Четверо пятиклассников Андрей, Борис, Вася и Гена решили определить свой вес. Однако все четверо мальчиков на весы не помещались, поэтому они стали взвешиваться по трое или по двое. Оказалось, что Андрей, Боря и Вася вместе весят 90 кг, Боря, Вася и Гена — 92 кг, а Андрей и Гена — 58 кг. Сколько весят все мальчики вместе?

**Решение:** Давайте сложим четыре результата, которые получились у мальчиков в условии задачи. Заметим, что тогда получится два-



жды вес всех мальчиков вместе, и он равен 240 кг. Значит, мальчики вместе весят 120 кг.

## Задача 5.

- В.** С 1 января цена билета в кинотеатр возросла по сравнению с декабрем на 20%, а выручка от продажи билетов возросла на 14%. Как изменилась посещаемость кинотеатра? Увеличилась или уменьшилась?

**Решение:** Если бы посещаемость кинотеатра не изменилась, то выручка бы увеличилась так же, как и цена билета — на 20 процентов. Однако общая выручка уменьшилась — значит, посетителей стало приходиться меньше. Можно даже посчитать, насколько меньше:  $\frac{1.14}{1.20} = 0.95$  — то есть, в кинотеатр теперь ходит 95% от прежнего количества посетителей.

- С.** В мешке у Деда Мороза лежат 10 красно-синих (т.е. одна половина красная, а другая — синяя), 7 сине-зеленых, 5 зелено-красных шаров. Какое наименьшее число шаров должен вынуть из мешка Дед Мороз, чтобы нашелся такой цвет, который будет присутствовать в окраске не менее чем в пяти из вынутых шаров?

**Решение:** Что означает, что нашёлся цвет, присутствующий в окраске пяти шаров? Это означает, что нашлись два сорта шаров (например, красно-зелёные и сине-зелёные), шаров из которых в сумме хотя бы пять.

Пусть Дед Мороз вынул пять шаров. Среди них должны присутствовать все три имеющихся типа, иначе есть два, которые в сумме дадут вынутые пять. Значит, шары распределены по типам как 2-2-1 или 3-1-1. Во втором случае какой шар ни возьми следующим — первый и второй или первый и третий типы в сумме дадут 5.

В первом случае можно взять ещё один шар третьего типа, а следующий, седьмой, уже даст нам пять шаров в сумме у двух типов.

Ответ — 7 шаров.

## Задача 6.

- А. Дед рассказывал своим внучатам: «В комнате стояло 5 стульев. На них сидели 4 матери, 4 дочери, 3 бабушки, 2 прабабушки и 1 прапрабабушка. При этом каждая из них сидела на отдельном стуле.» «Это невозможно», — возразили внучата. «Я сам видел», — ответил дед. Правду ли сказал дед внучатам?

**Решение:** Как ни странно, дед не соврал. Представим себе пять женщин: <sup>(1)</sup>совсем девочка, <sup>(2)</sup>её мама, <sup>(3)</sup>её бабушка, <sup>(4)</sup>её прабабушка, <sup>(5)</sup>её прапрабабушка.

Дочерьми здесь являются четверо: (1)–(4), и матерями тоже четверо: (2)–(5). Трое, (3)–(5), — бабушки; двое, (4)–(5), — прабабушки; одна прапрабабушка.

- С. Буратино не хотел ходить в школу, и черепаха Тортилла решила его проучить. Она не просто отдала ему Золотой ключик, а задала ему непростую задачу. Она вынесла три коробочки: красную, синюю и зеленую. На красной коробочке было написано «Здесь лежит Золотой ключик», на синей — «Зеленая коробочка пуста», а на зеленой — «Здесь сидит гадюка». Тортилла прочитала надписи Буратино и сказала: «Действительно, в одной коробочке лежит Золотой ключик, в другой — сидит гадюка, а третья коробочка пуста, но все эти надписи неверные». Где лежит Золотой ключик?

**Решение:** Надпись на синей коробочке неверна — значит, зелёная коробочка не пуста. И надпись на зелёной коробочке неверна — значит, в ней не гадюка. Отсюда в зелёной коробке лежит Золотой ключик.

## Задачи 6 класса

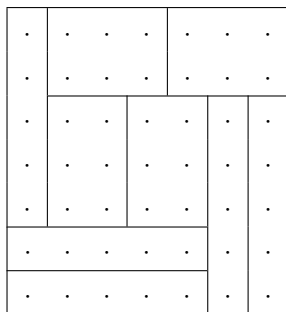
### Задача 2.

- В. Гастробайтер Гаджи хочет замостить квадратную комнату  $7 \times 7$  метров панелями  $1 \times 5$  и  $2 \times 3$  метров. Сколько панелей ему понадобится? Приведите пример такого замощения. Может ли он обойтись другим количеством панелей?

**Решение:** Разберёмся сначала с количеством панелей. Пусть есть замощение с  $A$  панелями  $1 \times 5$  и  $B$  панелями  $2 \times 3$ . Тогда число

49 — 5А должно делиться на 6 — в частности быть чётным. Среди всех чётных чисел, получающихся как 49 — 5А (4, 14, 24, 34, 44) на 6 делится только 24. Таким образом, замощение может состоять исключительно из 5 панелей  $1 \times 5$  и 4 панелей  $2 \times 3$ .

Зная это, придумать замощение несложно:



- С. У Карлсона было 20 банок варенья. Он расставил их на трех полках так, что на каждой полке стояло одинаковое количество литров варенья. На первую полку Карлсон поставил одну большую и четыре средних банки варенья, на вторую — две большие и шесть литровых банок, на третью — одну большую, три средних и три литровых банки. Сколько литров варенья было у Карлсона?

**Решение:** Сравним первую и третью полки Карлсона. На первой четыре средних банки, а на третьей — три средних и ещё три литра. Значит, в одной средней банке три литра варенья. Соответственно, в трёх средних банках — девять литров.

Теперь сравним вторую и третью полки. На третьей — одна большая банка и ещё 12 литров варенья. На второй — две больших и ещё 6 литров. Значит одна большая банка содержит в себе 6 литров варенья.

Таким образом, на второй полке  $2 \cdot 6 + 6 = 18$  литров варенья — и столько же на первой, и столько же на третьей. Значит, у Карлсона 54 литра варенья.

### Задача 3.

- С. Мальчик Вовочка записал в строчку один за другим 10 первых простых чисел в возрастающем порядке (единица не считается простым числом). Мальчик Дима сначала вычеркнул половину цифр

в полученном числе так, что получилось наибольшее число, а затем снова из этого же числа вычеркнул половину цифр так, что получилось наименьшее число. На сколько наибольшее число больше наименьшего?

**Решение:** Выпишем строку, полученную Вовочкой:

2357111317192329.

В ней 16 цифр, значит вычеркнуть надо 8. Первая цифра числа, которое мы получим, лежит среди первых 9 цифр строки — чтобы получить наибольшее число, мы должны максимизировать её. Подойдёт 7. Продолжая тем же образом, получим, что наибольшее число, которое мог получить Дима, —

77192329,

а наименьшее —

11111232.

Их разность равна 66081097.

## Задача 7.

**В.** Винни-Пух и Пятачок одновременно отправились в гости к друг другу. Но поскольку Винни-Пух всю дорогу сочинял очередную «шумелку», а Пятачок считал пролетающих галок, они не заметили друг друга при встрече. После встречи Пятачок подошел к дому Винни-Пуха через четыре минуты, а Винни-Пух подошел к дому Пятачка через одну минуту. Сколько минут был в пути каждый из них?

**Решение:** Пусть  $v_B$  — скорость Винни-Пуха,  $v_{\Pi}$  — скорость Пятачка, а  $t$  — время от их выхода из дома до встречи. Тогда из условия задачи ясно, что расстояние между домами Винни-Пуха и Пятачка выражается как

$$S = (t + 1)v_B = (t + 4)v_{\Pi} = t(v_B + v_{\Pi}).$$

Рассмотрим вторую и четвёртую части этого равенства:

$$tv_B + 1 \cdot v_B = tv_B + tv_{\Pi}$$

$$1 \cdot v_B = tv_{\Pi}$$

$$\frac{v_B}{v_{\Pi}} = \frac{t}{1}$$

Теперь, зная это, разберёмся со второй и третьей частями:

$$(t + 1)tv_{\Pi} = (t + 4)v_{\Pi}, \quad t > 0$$

$$t(t + 1) = t + 4$$

$$t^2 = 4 \implies t = 2.$$

Таким образом, Винни-Пух был в пути 3 минуты, а Пятачок — 6 минут.

## Задача 8.

- А.** Может ли какая-нибудь степень двойки содержать в своей записи поровну нулей, единиц, двоек, ..., девяток?

**Решение:** Пусть каждая из цифр встречается в этой степени двойки по  $k$  раз. Тогда сумма цифр степени двойки равна  $k(0 + \dots + 9) = k \cdot 45$ . То есть, по признаку делимости на 3, степень двойки делится на 3. Такого не может быть — получили противоречие.

- В.** Однажды перед сном мальчик Вовочка просчитал вслух от одного до тысячи. Сколько слов произнес Вовочка? Каждое слово считается столько раз, сколько оно произнесено.

**Решение:** Пусть  $D$  — количество слов, которое нужно произнести, чтобы посчитать от 1 до 99. Тогда всего Вовочка произнёс  $10D + 900 + 1$  слов: в каждой стоне нужно посчитать от 1 до 99, плюс 900 трёхзначных чисел дают по одному слову для обозначения сотен, плюс слово «тысяча».

Осталось найти  $D$ . 27 чисел требуют одно слово для произнесения: 1, 2, 3, ..., 19, 20, 30, 40, ..., 80, 90. Все остальные — а их  $99 - 27 = 72$  — по два слова. Отсюда

$$D = 72 \cdot 2 + 27 = 171;$$

$$10D + 901 = 2611.$$

## Задачи 7 класса

### Задача 1.

- А.** Существуют ли два таких натуральных числа, наибольший общий делитель которых равен 110, а наименьшее общее кратное равно 2000?

**Решение:** Таких чисел, конечно же, не существует, ведь наименьшее общее кратное всегда делится на наибольший общий делитель — а 2000 не делится на 110.

- В.** Вовочка умножил два подряд стоящих натуральных числа и получил число, состоящее из цифр 1, 3, 4, 5, 7, 8 и 9. Покажите, что Вовочка ошибся.

**Решение:**  $1 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 = 45 - 2 = 43$  — имеет остаток 1 при делении на 3. Значит, в соответствии с признаком делимости на 3, число, составленное из этих цифр, также будет иметь остаток 1. Произведение же двух последовательных натуральных чисел может иметь либо остаток 0 ( $0 \cdot 1 = 2 \cdot 0 = 0$ ), либо остаток 2 ( $1 \cdot 2 = 2$ ). Поэтому Вовочка неправ.

- С.** Существуют ли 2012 ненулевых числа, никакие два из которых не равны между собой, таких, что их сумма равна их произведению?

**Решение:** Укажем, как построить набор из таких чисел: он будет иметь вид

$$1, 2, 3, 4, \dots, 2011, x;$$

$$1 + 2 + 3 + \dots + 2011 + x = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot 2011 \cdot x.$$

Чтобы выполнить условие задачи, нужно взять  $x$ , равный

$$\frac{1 + 2 + 3 + \dots + 2011}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot 2011 - 1}.$$

– 199 –

Это число строго меньше единицы (очевидно), поэтому не будет совпадать ни с одним из взятых до него.

## Задача 2.

- А. Прямоугольник разрезами, параллельными его сторонам, разбит на 4 маленьких прямоугольника. Площади трех из них известны. Это 3, 4, 5. Найдите площадь четвертого.

**Решение:** Ответ в этой задаче зависит от того, какой из прямоугольников, площадь которого известна, находится «между» двумя другими:

4	3
$5 \cdot \frac{4}{3} = \frac{20}{3}$	5

3	4
$5 \cdot \frac{3}{4} = \frac{15}{4}$	5

3	5
$4 \cdot \frac{3}{5} = \frac{12}{5}$	4

- В. Мальчики Вова и Дима купили по одной новогодней открытке и каждый разрезал свою открытку на два прямоугольника равной площади. Один из прямоугольников мальчики выбросили, а другой оставили себе. Оказалось, что периметр Вовиного прямоугольника равен 14 см, периметр Диминого — 19 см. Найдите периметр и стороны прямоугольной открытки у каждого из мальчиков.

## Задача 3.

- А. Не используя технические средства, сравните дроби

$$\frac{2012}{2013} \quad \text{и} \quad \frac{2012000000002012}{2013000000002013}.$$

**Решение:** Эти дроби равны между собой: вторая получается из первой домножением числителя и знаменателя на 1000000000001.

## Задача 4.

- А. Какую четверку цифр надо приписать справа к числу 2012, чтобы полученное восьмизначное число делилось на 2013?

**Решение:** Очевидно, что числа 20130000 и 2013 делятся на 2013. Вычитая их друг из друга, получим все возможные ответы:

$$20130002013 = 20127987$$

$$2013000 - 2 \cdot 2013 = 20125974$$

$$2013000 - 3 \cdot 2013 = 20123961$$

$$2013000 - 4 \cdot 2013 = 20121948$$

- С. Произведение шести последовательных натуральных чисел может быть равно произведению трех последовательных натуральных чисел. Например,

$$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 = 8 \cdot 9 \cdot 10 = 720.$$

Есть ли еще такие числа?

**Решение:** В задаче требуется найти числа  $x, y$  такие, что

$$x(x+1) \dots (x+5) = y(y+1)(y+2).$$

Частично раскроем скобки в этом выражении —

$$(x^2 + 5x)(x^2 + 5x + 4)(x^2 + 5x + 6) = y(y+1)(y+2).$$

Отсюда

$$x^2 + 5x < y < x^2 + 5x + 4.$$

Для переменной  $y$  остаётся три варианта —  $x^2 + 5x + 1$ ,  $x^2 + 5x + 2$ ,  $x^2 + 5x + 3$ . Подставив каждый из этих вариантов в правую часть, можно убедиться, что решений для  $x > 1$  у уравнения не будет.

## Задача 5.

- С. Вдоль прямолинейной аллеи городского парка растет 5 деревьев. Известны 8 из 10 попарных расстояний между ними: 1 м, 1 м, 2 м, 2 м, 3 м, 3 м, 3 м, 4 м. Найдите два остальных расстояния.

**Решение:** Очевидно, что все попарные расстояния между деревьями целые — в том числе остальные два: в противном случае нецелых расстояний было бы больше, чем два. Значит, мы можем считать, что все деревья расположены в целых точках вещественной оси.



Некоторые из самых маленьких расстояний среди перечисленных являются расстояниями между соседними деревьями — два однометровых расстояния точно такие. Может быть так, что метровые промежутки между деревьями являются соседними ( $a \xleftrightarrow{1\text{ м}} b \xleftrightarrow{1\text{ м}} c$ ), а может, что и нет.

В первом случае одно из двухметровых расстояний получается как сумма однометровых. У оставшегося двухметрового расстояния не остаётся других вариантов, кроме как быть длиной промежутка между соседними деревьями.

Если это два дерева, отличные от  $a, b, c$ , то получается следующая ситуация:

$$a \xleftrightarrow{1\text{ м}} b \xleftrightarrow{1\text{ м}} c \quad d \xleftrightarrow{2\text{ м}} e.$$

Тогда  $cd = 3\text{ м}$ , и другие трёхметровые расстояния нам попросту никуда не вписать.

Если одно из этих двух деревьев —  $a$  или  $c$ , то получаем однозначный вариант:

$$d \xleftrightarrow{2\text{ м}} a \xleftrightarrow{1\text{ м}} b \xleftrightarrow{1\text{ м}} c \xleftrightarrow{3\text{ м}} e,$$

Который, очевидно, не удовлетворяет условию задачи.

Во втором случае двухметровые расстояния также являются расстояниями между соседними деревьями. Это даёт нам однозначный с точностью до симметрии ответ: деревья стоят в точках 0, 1, 3, 4, 6, и оставшиеся два расстояния — 5 и 6.

## Задачи 8 класса

### Задача 3.

**В.** Натуральные числа  $m, n$  удовлетворяют равенству

$$(m - n)^2 = \frac{4mn}{m + n - 1}.$$

Докажите, что  $m + n$  — квадрат натурального числа.

**Решение:** По условию задачи,

$$(m - n)^2(m + n - 1) - 4mn = 0.$$

Продолжим цепочку равенств:

$$\begin{aligned} (m - n)^2(m + n - 1) - 4mn &= \\ &= m^3 + n^3 - m^2n - mn^2 - m^2 - 2mn - n^2 = \\ &= (m + n)(m^2 - mn + n^2) - mn(m + n) - (m + n)^2 = \\ &= (m + n)(m - n)^2 - (m + n)^2. \end{aligned}$$

Отсюда можно понять, что число  $m + n$  является отношением двух квадратов а, значит, и само квадрат.

С. Вещественные числа  $x, y$  удовлетворяют соотношениям

$$x^2 + xy + y^2 = 4 \quad \text{и} \quad x^4 + x^2y^2 + y^4 = 8.$$

Найти значение выражения  $x^6 + x^3y^3 + y^6$ .

**Решение:**

$$\begin{cases} (x + y)^2 - xy = 4 \\ (x + y)^4 - 4xy(x + y)^2 + 2(xy)^2 = 8 \\ \text{Найти } (x + y)^6 - 6xy(x + y)^4 + 9(xy)^2(x + y)^2 - (xy)^3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_1 - T_2 = 4 & (T_1 = T_2 + 4) \\ T_1^2 - 4T_1T_2 + 2T_2^2 = 8 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} (T_2 + 4)^2 - 4(T_2 + 4)T_2 + 2T_2^2 &= 8 \\ -T_2^2 - 8T_2 + 8 &= 0 \\ T_2 &= -4 \pm 2\sqrt{6} \quad (T_1 = \pm 2\sqrt{6}) \end{aligned}$$

Теперь мы знаем сумму и произведение  $x$  и  $y$ . Можно как подставить значения  $T_1$  и  $T_2$  в выражение в первой системе, равное исходному, так и явно найти  $x, y$  и посчитать нужное выражение для них.

## Задача 4.

- А. Какое из чисел 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 надо выбросить, чтобы сумма квадратов из трёх оставшихся чисел оказалась равной сумме квадратов других трёх оставшихся чисел?

**Решение:** Сейчас у нас есть семь «подозреваемых» чисел, которые можно выкинуть. Давайте сократим их количество. Заметим, что если две суммы чисел равны, то они равны и по модулю 2, и по модулю 3. Выпишем остатки от деления квадратов чисел 1–7 на 2 и на 3 и посмотрим, какой из них нужно выкинуть, чтобы можно было поделить оставшееся на две части.

х	1	2	3	4	5	6	7
$x^2 \bmod 2$	1	0	1	0	1	0	1
$x^2 \bmod 3$	1	1	0	1	1	0	1

Легко понять, что надо сверху выкинуть ноль (чтобы сумма оставшихся чисел была чётна), а снизу единицу. То есть, либо  $2^2$ , либо  $4^2$ .

Сумма  $1^2 + \dots + 7^2$  равна 140.  $\frac{140-4}{2} = 68$ ,  $68 - 49 = 19$  — двумя из трёх квадратов, которые мы поместим вместе с 49, нельзя собрать 19 (потому что 19 вообще не получается как сумма двух квадратов), поэтому вариант с выкидыванием двойки не подходит.

Наконец,  $\frac{140-16}{2} = 62$ ,  $49 + 9 + 4 = 62 = 36 + 25 + 1$ . Это и есть ответ.

- С. Найдите все пары  $(x, y)$  неотрицательных целых чисел, удовлетворяющих равенству

$$x - y = x^2 + xy + y^2.$$

**Решение:** Заметим, что при  $x \geq 2$  правая часть строго больше  $x$ , а левая — не больше его. Значит,  $x = 0$  или  $x = 1$ . Если  $x = 0$ , то  $-y = y^2$ ,  $y = 0$ . Если  $x = 1$ , то  $1 - y = y^2 + y + 1$ ,  $y(y + 2) = 0$ ,  $y = 0$ .

Ответ:  $(0, 0)$ ,  $(1, 0)$ .

## Задача 7.

- А. У бизнесмена Березова было предприятий в 3 раза меньше, чем у бизнесмена Романова. Если бы Березов отсудил еще столько же

предприятий у Романова, сколько имел, то у них обоих число предприятий стало бы одинаково. Сколько предприятий было у бизнесмена Романова?

**Решение:** Любое число предприятий, кратное трём.

Действительно, если у Романова сейчас  $3x$  предприятий, то у Березова  $x$ . И если Березов отсудит  $x$  предприятий у Романова, то у обоих станет поровну — по  $2x$ . И этот результат не зависит от конкретного  $x$ , то есть, рассуждения можно проделать при любом его значении.



# Задачи 2011 года

## Задачи 5 класса

### Задача 1.

С. У Димы есть прибор с четырьмя кнопками – двумя красными и двумя синими. Нажатие одной из красных кнопок приводит к тому, что число на табло прибора умножается на 2, а другой – умножается на 5. Нажатие же одной из синих кнопок приводит к тому, что к числу на табло прибора прибавляется 2, а другой – прибавляется 5. Вначале на табло прибора было записано число 2. Может ли мальчик Дима, нажимая эти кнопки, получить из него число 2011, если, недолго думая, Дима нажал синюю кнопку? А красную кнопку?

**Решение:** Да, может. Во всех случаях, кроме того, когда Дима умножил число на 5, это следует из того, что  $2002 = 2011 - 9$  кратно 7: сперва получим 9, а потом прибавляем 7 (получаемое как  $2 + 5$ ) нужное количество раз.

В случае, когда Дима нажатием красной кнопки получил 10, надо заметить, что  $1995 = 2011 - 16$  кратно 5, то есть надо получить 6, прибавив 2 два раза, и далее прибавить 5 нужное количество раз.

### Задача 2.

С. Гена и Вова вышли в разное время из деревни Светлый Путь в деревню Полная Жуть, каждый с некоторой постоянной скоростью. Когда Гена прошёл треть всего пути, Вова прошёл четверть всего пути. Когда же Вове оставалось пройти четверть пути, Гене ещё оставалось пройти треть всего пути. Кто из ребят шёл быстрее и во сколько раз? Кто из них раньше вышел из деревни Светлый Путь, и кто из них раньше придёт в деревню Полная Жуть?

**Решение:** Для удобства обозначим момент времени когда Гена прошёл треть всего пути за  $T_0$ , а когда две трети — за  $T_1$ . Поскольку Вова за  $T_1 - T_0$  прошёл  $(1 - \frac{1}{4}) - (\frac{1}{4}) = \frac{1}{2}$  всего пути, а Гена —  $\frac{1}{3}$ , Вова шёл

быстрее и, поскольку в момент  $T_1$  он уже обогнал Гену, в Полной Жути он окажется раньше, хотя из Светлого Пути он вышел позже. То же соображение позволяет заключить, что скорость Вовы в  $\frac{3}{2}$  раза больше скорости Гены.

## Задача 4.

С. Лидер партии «В здоровом теле - здоровый дух» взял с собой в командировку кусок мыла. Вечером седьмого дня командировки он отметил, что размеры куска сократились в два раза. Хватит ли ему мыла на оставшиеся два дня? Предполагается, что партиец каждый день использует одинаковое количество мыла.

**Решение:** Если размеры куска мыла уменьшились в два раза, то объем уменьшился в  $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$  раз. Таким образом, к вечеру седьмого дня мыло уменьшилось в восемь раз, и, следовательно, от всего мыла было использовано  $\frac{7}{8}$ . Значит, в день использовалась  $\frac{1}{8}$  часть мыла. Таким образом, мыла осталось всего на один день. Ответ: нет, не хватит.

## Задачи 6 класса

### Задача 3.

С. Про натуральные числа  $a$  и  $b$  ( $a > b$ ) известно, что число  $2001a^2 - 40b - b^2$  делится на 14. Какое наименьшее значение может принимать выражение  $a^2 - b^2$ ?

**Решение:** Преобразуем выражение:

$$2001a^2 - 40ab - b^2 = 14 \cdot (143a^2 - 3ab) - (a - b)^2.$$

Отсюда видно, что исходное выражение кратно 14 тогда и только тогда, когда  $(a - b)^2$  делится на 14. Но 14 не содержит полных квадратов в разложении на множители, поэтому это верно если и только если  $a - b$  делится на 14. Так как  $a, b$  — натуральные и  $a > b$ , то  $a = 15$  и  $b = 1$  — наименьшие  $a$  и  $b$ , при которых это выполняется. Ответ: 16.

## Задачи 7 класса

### Задача 1.

**В.** Отрезок  $AB$  разбит на  $n$  равных отрезков, на каждом из которых как на диаметре построена окружность. Какие значения может принимать сумма длин всех этих окружностей, если длина  $AB = 2011$  см?

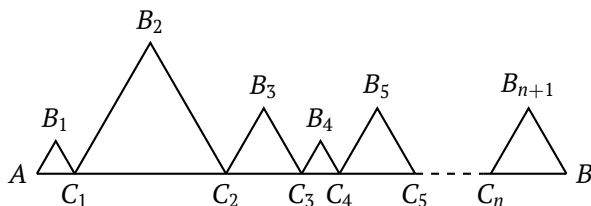
**Решение:** Как известно, длина окружности диаметра  $d$  равна  $\pi d$ . Поэтому если  $d_1, d_2, \dots, d_n$  — диаметры соответствующих окружностей, то сумма длин этих окружностей будет

$$\pi d_1 + \pi d_2 + \dots + \pi d_n = \pi(d_1 + d_2 + \dots + d_n) = \pi AB = 2011\pi.$$

### Задача 6.

**В.** На отрезке  $AB$  длиной 38 см между  $A$  и  $B$  отмечены точки  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$  и построены равнобедренные треугольники с основаниями  $AC_1, C_1C_2, C_2C_3, \dots, C_nB$ . Зависит ли сумма длин сторон треугольников, лежащих вне отрезка  $AB$ , от количества отмеченных точек и их размещения на  $AB$ ?

**Решение:** Для треугольника с основанием  $C_kC_{k+1}$  обозначим  $B_{k+1}$  его третью вершину. Для треугольников с основаниями  $AC_1$  и  $C_nB$  третьи вершины обозначим  $B_1$  и  $B_{n+1}$  соответственно.



В введенных обозначениях на сумму всех указанных сторон выполняются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} (AB_1 + B_1C_1) + (C_1B_2 + B_2C_2) + \dots + (C_nB_{n+1} + B_{n+1}B) &= \\ = 2(AC_1 + C_1C_2 + C_2C_3 + \dots + C_{n-1}C_n + C_nB) &= \\ = 2AB, \end{aligned}$$

откуда видно, что указанная сумма не зависит от выбранных точек  $C_1, \dots, C_n$ .



**С.** Каждая грань кубика разделена на 4 квадрата, и каждый квадратик окрашен в один из трёх цветов: синий, жёлтый или красный так, что квадратики, имеющие общую сторону, окрашены в разные цвета. Сколько при этом может быть красных, жёлтых и синих квадратов?

**Решение:** Рассмотрим какой-нибудь угол данного кубика. К нему прилежит три квадрата, причем все они попарно касаются друг друга по стороне. Поэтому рассматриваемые квадратики представляют все три цвета. Значит, при каждом угле нашего кубика есть ровно один квадратик данного цвета. Поскольку углов всего 8, каждый цвет представлен 8 раз.

## Задачи 8 класса

### Задача 2.

**В.** Будем мыслить плоскость как лист бумаги. На нём начертили две перпендикулярные прямые, согнули лист по одной прямой, затем по другой и прокололи в двух местах. После этого лист разогнули и через каждые две получившиеся проколами точки провели прямую. Сколько прямых при этом могло получиться?

**Решение:** Возможны три варианта:

1. Никакие три точки не лежат на одной прямой. Тогда прямых ровно столько, сколькими способами можно выбрать пару точек из восьми различных. Это число легко подсчитать — для каждой из восьми точек существует семь вариантов дополнить ее до пары; каждую пару мы посчитаем таким образом два раза, поэтому результат

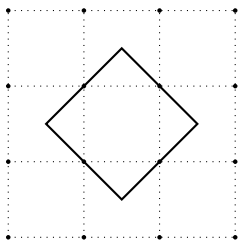
$$\frac{8 \cdot 7}{2} = 28.$$

2. Три точки, лежащие по одну сторону относительно одной из проведенных осей перегиба (обозначим ее  $l$ ), лежат на одной прямой. Тогда и четвертая лежит на этой же прямой, а также четыре точки, лежащие по другую сторону от  $l$ , опять же лежат на одной прямой — это очевидные соображения симметрии. Если проводить подсчет как в первом случае, мы посчитаем 10 лишних прямых, поэтому ответ будет 18.

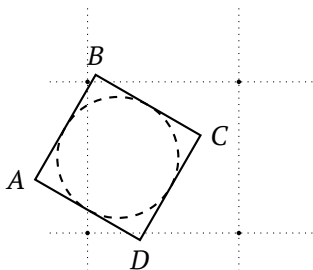
3. Три точки лежат на одной прямой, причем прямая эта проходит через пересечение осей перегиба. Аналогично случаю два мы получаем, что четвертая точка должна лежать на этой же прямой, а остальные четыре — на другой прямой. Из тех же соображений ответ 18.

- С. На координатной плоскости отмечены точки с целыми координатами. Какую наибольшую площадь может иметь квадрат, не содержащий ни одной отмеченной точки?

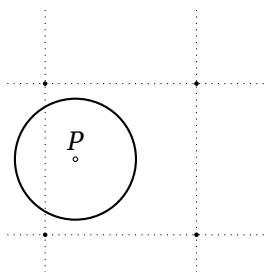
**Решение:** Квадрат с вершинами в точках  $(-0.5, 0.5)$ ,  $(0.5, 1.5)$ ,  $(1.5, 0.5)$  и  $(0.5, -0.5)$  будет иметь площадь, равную 2.



Покажем, что эта площадь максимальна. В самом деле, рассмотрим некоторый квадрат  $ABCD$  со стороной  $d$ , удовлетворяющий условию. Впишем в этот квадрат круг — его радиус будет  $\frac{d}{2}$ , и он тоже не содержит отмеченных точек.



Давайте теперь вместо размещения квадрата на плоскости будем размещать круг: про него проще рассуждать. Рассмотрим центр этого круга,  $P$ , эта точка находится в некотором единичном квадрате, образованном соседними отмеченными точками.



Ясно, что расстояние от любой точки единичного квадрата до ближайшей отмеченной точки не превышает  $\frac{\sqrt{2}}{2}$ . А поскольку радиус круга  $\frac{d}{2}$  не превышает расстояние от  $P$  до ближайшей отмеченной точки (круг не содержит отмеченных точек), то и  $\frac{d}{2} \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$ . Поэтому и площадь квадрата  $ABCD$ , равная  $d^2$ , не превышает 2.

### Задача 3.

- С. Пара целых чисел  $x$  и  $y$  в пределах первого десятка называется симпатичной, если  $x > y^2 + 1$ , и называется приятной, если  $y < x^2 + 1$ . Существуют ли приятные, но несимпатичные пары? А симпатичные, но неприятные?

**Решение:** Для пары целых положительных чисел, очевидно, из неравенства  $x > y^2 + 1$  следует неравенство  $x > y$ , и уж тем более  $y < x^2 + 1$ , поэтому любая симпатичная пара является приятной. Однако приятная пара отнюдь не обязана быть симпатичной — примером несимпатичной приятной пары будет  $x = 1, y = 1$ .

### Задача 4.

- В. Рассматриваются наборы из 5 чисел, каждое из которых равно 1 или -1. Разрешается в каждом наборе изменять знак одновременно у трёх чисел. Можно ли с помощью этой операции от любого заданного набора перейти к любому другому из этих наборов?

**Решение:** Да, возможно. Чтобы показать это, достаточно доказать, что от любого набора можно перейти к набору  $(1, 1, 1, 1, 1)$ . Выполнив же соответствующие операции смены знака в обратном порядке, мы можем перейти от набора  $(1, 1, 1, 1, 1)$  к любому другому набору.

Рассмотрим для начала набор, в котором ровно два отрицательных числа; поскольку порядок не имеет значения, без умаления общно-

сти он выглядит так:  $(-1, -1, 1, 1, 1)$ . Сделаем следующие преобразования:

$$(\underline{-1}, -1, \underline{1}, 1, 1) \rightarrow (1, \underline{-1}, -1, \underline{-1}, 1) \rightarrow (1, 1, 1, 1, 1)$$

Итак, в случае двух отрицательных чисел мы знаем, что делать. Случай трёх отрицательных очевиден. Все остальные случаи сводятся к случаю двух или трех отрицательных:

$$\begin{aligned} (\underline{-1}, \underline{1}, 1, 1, 1) &\rightarrow (1, -1, -1, 1, 1) \\ (-1, -1, \underline{-1}, -1, 1) &\rightarrow (-1, -1, 1, 1, -1) \\ (-1, -1, \underline{-1}, -1, -1) &\rightarrow (-1, -1, 1, 1, 1) \end{aligned}$$

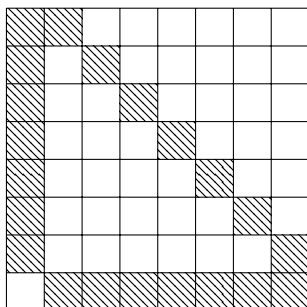
## Задача 8.

- С. Квадрат состоит из  $(n+1) \times (n+1)$  белых клеток. Вовочка закрашивает некоторые клетки квадрата в чёрный цвет, а Дима вычёркивает какие-либо  $n - 1$  столбцов и  $n - 1$  строк этого квадрата. Докажите, что Вовочка может закрасить  $3n$  клеток так, что при любом диминном вычёркивании в квадрате оставалась бы по крайней мере одна белая клеточка.

**Решение:** Приведем вариант раскраски, из которой Дима не сможет вычеркнуть все белые клетки.

Первые  $n$  клеток Вовочка должен отметить в колонке 1 квадрата со строки 1 по  $n$ , вторые  $n$  клеток — в  $n + 1$  строке со колонки 2 до  $n + 1$ , и остающиеся  $n$  клеток — на диагонали  $(2, 1) \dots (n + 1, n)$ , всего закрашено  $3n$  клеток.

Пример раскраски для  $n = 8$  приведён ниже:



Поясним, почему при любом диминном вычёркивании останется хо-

тя бы одна белая клетка. Заметим, что в данной раскраске любые две колонки имеют одновременно закрашенные клетки ровно в одной строке: колонки со 2 по  $n+1$  — в нижней строке, колонка 1 имеет закрашенную одновременно с колонкой  $t$  клетку в строке  $t-1$ . Значит, какие мы две колонки и строки не выберем, даже если одна из строк в пересечении с колонками и даст две одновременно закрашенные клетки, вторая строка даст в пересечении хотя бы одну белую клетку всё равно.

## Задачи 9 класса

### Задача 1.

А. Дано 82 числа, каждое из которых равно 1 или -1. Можно ли их разбить на две группы так, чтобы суммы чисел, входящих в каждую группу, были равны?

**Решение:** Обозначим за  $S_k$  сумму первых  $k$  чисел, и положим  $S_0 = 0$ .  $S_k$  отличается от  $S_{k+1}$  в точности на 1 (на каждом шаге мы прибавляем или вычитаем 1), поэтому все целые числа между 0 и  $S_{82}$  достигаются на каком-то шаге.

Обозначим за  $n$  число минус единиц среди 82 чисел. Тогда  $S_{82} = 82 - 2n$  и  $\frac{S_{82}}{2} = 41 - n$ . При этом, поскольку  $41 - n$  целое, и поскольку справедливо  $|82 - 2n| = 2 \cdot |41 - n|$ , то число  $41 - n$  находится между 0 и  $S_{82}$ , то есть достижимо на каком-то шаге  $k$ :  $S_k = 41 - n$ .

Возьмём первые  $k$  чисел в первую группу, и оставшиеся  $82 - k$  чисел во вторую; это и будет доказательством положительного ответа на вопрос задачи.

### Задача 2.

С. В вершинах квадрата поставлены натуральные числа, большие 1, причём пары чисел, стоящие на концах сторон, не взаимно просты, а на концах диагоналей — взаимно просты. Найти такие четыре числа, удовлетворяющие этому условию, чтобы наибольшее из них было наименьшим из возможных.

**Решение:** Пусть  $a, b, c, d$  — числа, записанные в вершинах квадрата в порядке обхода вершин по часовой стрелке.

Заметим, что так как  $a$  не взаимнопросто с  $b$  и  $d$ , то можно разложить эти числа в следующие произведения:  $a = pqx$ ,  $b = py$ ,  $d = qt$ , причём  $p > 1$ ,  $q > 1$  и  $\text{НОД}(pux, qt) = 1$ .

Применив эти рассуждения к каждой вершине квадрата, получаем, что каждое из чисел является составным, причём среди этих чисел используется в сумме как минимум четыре простых сомножителя, так как  $\text{НОД}(py, qt) = 1$ .

Поэтому нам нужно взять первые четыре простых числа (2, 3, 5 и 7) — любые другие бóльшие простые числа только увеличат значения в вершинах — и с помощью небольшого перебора выбрать из их шести попарных произведений четыре:

$$a = 5 \cdot 2, b = 5 \cdot 3, c = 3 \cdot 7, d = 2 \cdot 7.$$

### Задача 3.

- С. Найдите наименьшее  $x$ , для которого выполняются равенства:  $x = a + b + c = d + e + f$ , где  $a, b, c, d, e$  и  $f$  — попарно различные натуральные числа.

**Решение:** Заметим, что  $a + b + c + d + e + f = 2x$ . Но сумма первых шести натуральных чисел равна 21, нечётному числу. Уменьшить сумму мы не можем, значит, её надо увеличить хотя бы до ближайшего чётного, до 22; то есть  $x \geq 11$ . Теперь заметим, что  $x \leq 11$ , поскольку  $1 + 3 + 7 = 2 + 4 + 5 = 11$ .

Ответ:  $x = 11$ .



# Задачи Петербургских турниров юных математиков

## Задачи 2018 года

### Задача 1. Узоры на скатерти Улама

Расположим натуральные числа в виде спирали, как показано на рисунке ниже. Полученная картинка называется скатертью Улама.

37	36	35	34	33	32	31
38	17	16	15	14	13	30
39	18	5	4	3	12	29
40	19	6	1	2	11	28
41	20	7	8	9	10	27
42	21	22	23	24	25	26
43	44	45	46	47	48	...

В этой задаче требуется изучить закономерности и узоры, связанные с расположением разных числовых последовательности на скатерти. Интерес представляют не только гипотезы, полученные, например, на компьютере, но и явные соотношения.

1. Выясните, как на скатерти Улама описываются числовые последовательности на вертикальных, горизонтальных и диагональных прямых.
2. Исследуйте на скатерти расположения
  - а) квадратных чисел  $\mathcal{F}_n^{(4)}$ ,
  - б) треугольных чисел  $\mathcal{F}_n^{(3)}$  (найдите количество ветвей на получающейся картинке),



- с) фигурных чисел разных порядков  $\mathcal{F}_n^{(m)}$ ,  
 d) многомерных фигурных чисел.

3. Исследуйте на скатерти Улама расположения арифметических и геометрических прогрессий. Попробуйте также описать расположения известных числовых последовательностей, возникающих в комбинаторике: чисел Фибоначчи, чисел Каталана и т.п.
4. Рассмотрите другие нумерации целых точек всей плоскости или каких-то фигур на этой плоскости. Например, занумеруем сектор следующим образом:

1					
2	3				
4	5	6			
7	8	9	10		
11	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	21

Ответьте на сформулированные выше вопросы для новых нумераций.

## Задача 2. Префиксные отображения

Пусть  $X_1, X_2, X_3, \dots$  — последовательность множеств. Обозначим через  $P$  множество всех последовательностей  $a = (a_1, a_2, \dots)$ , где  $a_i \in X_i$ . Последовательность  $a^{(i)}$  элементов  $P$  (то есть последовательность последовательностей) назовём сходящейся к элементу  $a \in P$ , если для каждого фиксированного  $n$  последовательность  $a_n^{(i)}$  стабилизируется и  $a_n^{(i)} = a_n$  для достаточно больших  $i$ . Подмножество  $C \subseteq P$  называется замкнутым, если любая сходящаяся последовательность элементов из  $C$  сходится к элементу из  $C$ . Отображение  $F : P \rightarrow P$  называется замкнутым, если оно переводит замкнутые подмножества в замкнутые подмножества.

Рассмотрим набор отображений

$$f_i : X_1 \times \dots \times X_i \longrightarrow X_i,$$

каждое из которых будем называть префиксными компонентами. По префиксным компонентам зададим префиксное отображение — функцию

$F : P \rightarrow P$ , действующую по формуле

$$F(x_1, x_2, x_3, \dots) = (f_1(x_1), f_2(x_1, x_2), f_3(x_1, x_2, x_3), \dots).$$

1. Приведите пример функции, не являющейся префиксным отображением. Докажите, что если все  $X_i$  конечны, то любое префиксное отображение замкнуто.
2. Пусть  $X_i = \mathbb{R}^{n_i}$ . Докажите, что если компоненты префиксного отображения являются линейными отображениями, то такое префиксное отображение замкнуто.
3. Пусть компоненты  $f_i$  не зависят от первых  $i - 1$  переменной для любого  $i$ , то есть существуют функции  $g_i : X_i \rightarrow X_i$  такие, что  $f_i(a_1, \dots, a_i) = g_i(a_i)$ . Докажите, что такое префиксное отображение замкнуто.
4. Покажите, что если все  $X_i$  бесконечны, то существует незамкнутое префиксное отображение. А если некоторые из  $X_i$  конечны?
5. Пусть  $X_i = \mathbb{R}^2$ . Существуют ли незамкнутые префиксные отображения, компоненты которых заданы многочленами?
6. Пусть  $X_i = \mathbb{R}^{n_i}$ . Предложите свои условия, при которых префиксное отображение будет замкнутым.

### Задача 3. Обобщенные гиперболические и тригонометрические системы

Пусть  $n \geq 2$ . Набор бесконечно-дифференцируемых функций  $\mathbf{H}_n = (H_1, \dots, H_n)$  из  $\mathbf{R}$  в  $\mathbf{R}$  назовём *гиперболической системой* порядка  $n$ , если  $H'_i = H_{i+1}$  для  $1 \leq i < n$ ,  $H'_n = H_1$  и  $H_i(0) = \delta_{i,n}$ . Аналогично, набор бесконечно-дифференцируемых функций  $\mathbf{T}_n = (T_1, \dots, T_n)$  из  $\mathbf{R}$  в  $\mathbf{R}$  называется *тригонометрической системой* порядка  $n$ , если  $T'_i = T_{i+1}$  для  $1 \leq i < n$ ,  $T'_n = -T_1$  и  $T_i(0) = \delta_{i,n}$ .

1. Докажите, что пары  $(\operatorname{sh}(t), \operatorname{ch}(t))$  и  $(\sin(t), \cos(t))$  задают, соответственно, единственные возможные гиперболические и тригонометрические системы порядка 2. В явном виде опишите гиперболические и тригонометрические системы порядка  $n$ .
2. Докажите, что для гиперболических и тригонометрических систем порядка 2 выполнены формулы Эйлера:  $H_2(t) + H_1(t) = e^t$  и  $T_2(t) + iT_1(t) = e^{it}$ . Обобщите их на произвольные системы  $\mathbf{H}_n, \mathbf{T}_n$ .

3. При всех  $1 \leq i \leq n$  выразите  $H_i(s+t)$  через  $H_j(s)$ ,  $H_k(t)$  и  $T_i(s+t)$  через  $T_j(s)$ ,  $T_k(t)$ . Кроме того, исследуйте функции из наборов  $\mathbf{H}_n$  и  $\mathbf{T}_n$  на четность и нечетность.

Пусть  $\lambda \in \mathbf{R}_+$ . Изучите предыдущие пункты для модифицированных систем  $\mathbf{H}_n^\lambda$  и  $\mathbf{T}_n^\lambda$ , в определении которых фигурируют равенства  $H'_n(t) = \lambda H_1(t)$  и  $T'_n(t) = -\lambda T_1(t)$ , соответственно.

4. Докажите, что для гиперболических и тригонометрических систем порядка 2 выполнены соотношения  $H_2^2(t) - H_1^2(t) = 1$  и  $T_2^2(t) + T_1^2(t) = 1$ . Иными словами, образы при отображениях  $L_2 : t \mapsto (H_1(t), H_2(t))$  и  $M_2 : t \mapsto (T_1(t), T_2(t))$  из  $\mathbf{R}$  в  $\mathbf{R}^2$  могут быть заданы алгебраическими уравнениями. Выясните, можно ли задать образы при отображениях

$$L_n : t \mapsto (H_1(t), \dots, H_n(t))$$

$$M_n : t \mapsto (T_1(t), \dots, T_n(t))$$

из  $\mathbf{R}$  в  $\mathbf{R}^n$  алгебраическими уравнениями. В частности, найдите однородные многочлены  $p_n, q_n$  степени  $n$  такие, что для  $f_n := p_n - 1$  и  $g_n := q_n - 1$  выполнено

$$f_n(H_1(t), \dots, H_n(t)) = 0,$$

$$g_n(T_1(t), \dots, T_n(t)) = 0$$

при любом  $t$ . Например,  $f_2(x, y) = y^2 - x^2 - 1$  и  $g_2(x, y) = y^2 + x^2 - 1$ . Верно ли, что многочлены  $f_n, g_n \in \mathbf{Q}[x_1, \dots, x_n]$  неприводимы?

5. Опишите все перестановки  $\sigma \in S_n$ , для которых  $p_n(x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n)}) = p_n(x_1, \dots, x_n)$  при всех  $x_1, \dots, x_n$ . Аналогичный вопрос для  $q_n$ .
6. Опишите все точки образов  $L_n$  и  $M_n$  в  $\mathbf{R}^n$  с целыми координатами. Опишите все точки с рациональными координатами.

Придумайте, как по двум целым / рациональным точкам из образов  $L_n, M_n$  получить новую целую / рациональную точку на  $L_n$  и  $M_n$  соответственно. Изучите получающееся «сложение точек».

## Задача 4. Многоугольники

1. Пусть  $F_1$  и  $F_2$  - два выпуклых многоугольника, множества вершин которых совпадают. Покажите, что  $F_1$  равен  $F_2$ .

2. Пусть  $F_1$  и  $F_2$  не обязательно выпуклы, но удовлетворяют условию про вершины. Выясните, что можно сказать про их расположение.
3. Пусть  $F_1$  и  $F_2$  выпуклы, а середины сторон  $F_1$  лежат в  $F_2$ . Как связаны площади  $F_1$  и  $F_2$ ?
4. Пусть  $F_1$  и  $F_2$  выпуклы, а середины сторон  $F_1$  лежат в  $F_2$  и середины сторон  $F_2$  лежат в  $F_1$ . Верно ли, что такие многоугольники равны?
5. Зафиксируем  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Точка на стороне многоугольника называется его  $\alpha$ -серединой, если она делит эту сторону в отношении  $\alpha : (1 - \alpha)$ . Известно, что для каждой стороны  $F_1$  какая-то  $\alpha$ -серединая лежит в  $F_2$ . Что можно сказать про площади  $F_1$  и  $F_2$ ?
6. Исследуйте предыдущие вопросы в случае, когда один из многоугольников не обязательно выпуклый.

## Задача 5. Конечные вычисления

Основная идея этой задачи — исследование дискретных аналогов дифференцирования и интегрирования. Интерес представляют явные сравнения непрерывных и дискретных конструкций между собой.

Обозначим через **Seq** множество всех вещественных числовых последовательностей. Сами последовательности будем обозначать символами  $x_n \in \mathbf{Seq}$ , а их соответствующие элементы (значения) под номером  $k$  черз  $x_n[k]$  (начиная с 0). Таким образом,  $x_n = y_n \iff x_n[k] = y_n[k], \forall k \geq 0$ .

Определим функции  $\Delta, \int$  из **Seq** в **Seq** по правилам

$$(\Delta x_n)[k] := x_n[k + 1] - x_n[k]$$

$$\left( \int x_n dn \right) [k] := \sum_{i=0}^{k-1} x_n[i].$$

Они называются разностным оператором и оператором суммирования, а последовательности  $\Delta x_n, \int x_n dn$  — производной и интегралом  $x_n$  соответственно. Если  $\Delta F_n = x_n$ , то  $F_n$  называется первообразной  $x_n$ . Если  $A$  — некоторый оператор (т.е. функция из **Seq** в **Seq**), то  $A^n$  — это новый оператор, являющийся композицией  $A$  с собой  $n$  раз.

1. Опишите связи между производной, интегралом, первообразной и сдвигом  $x_n$ , где под сдвигом понимается  $(Ex_n)[k] = x_n[k + 1]$ . Кроме того, найдите явную формулу для  $\Delta^m x_n$ .

Константы  $c \in \mathbf{R}$  задают постоянные и показательные последовательности  $c, c^n \in \mathbf{Seq}$  по формулам  $c[k] := c$  и  $c^n[k] := c^k$ . Кроме того, определим для  $m = 0, 1, 2, \dots$  последовательности  $n^m$  и  $n^{\underline{m}}$  степеней и падающих степеней по формулам  $n^m[k] := k^m$  и  $n^{\underline{m}}[k] := k(k-1)(k-2) \cdot \dots \cdot (k-(m-1))$ . Набор всех последовательностей из  $\mathbf{Seq}$ , которые могут быть выражены как линейные комбинации последовательностей  $1, n, n^2, \dots, n^{m-1}$ , обозначим через  $\mathbf{P}_m$ . Аналогично, через  $\mathbf{FP}_m$  обозначим последовательности, являющиеся линейными комбинациями падающих степеней  $1, n, n^2, \dots, n^{m-1}$ . Последовательности из  $\mathbf{P}_m$  или  $\mathbf{FP}_m$  будем называть полиномиальными.

2. Выясните, как связаны между собой  $\mathbf{P}_m$  и  $\mathbf{FP}_m$  и предложите какие-нибудь интересные эквивалентные описания последовательностей из этих множеств. Точнее, сравните  $\mathbf{P}_i$  и  $\Delta^i$ . А как связаны между собой  $\int x_n dn$  и  $\mathbf{P}_i$ ?
3. Найдите дискретные аналоги формул Ньютона–Лейбница и интегрирования по частям. Затем найдите в явном виде  $\int n dn, \int n^2 dn, \int F_n^{(3)} dn, \int \lambda^n dn, \int n \lambda^{n-1} dn, \int n^2 2^{n-1} dn, \int F_n^{(m)} dn$ . Существует ли комбинаторное / геометрическое решение? Предложите свои собственные числовые последовательности и опишите их производные и интегралы. Например, рассмотрите известные числовые последовательности такие, как числа Фибоначчи.
4. Рассмотрим последовательность  $S_n^{(m)}$ , которая определяется по формуле  $S_n^{(m)} := \int n^m dn$ . Покажите, что  $S_n^{(m)}$  является полиномиальной последовательностью и в явном виде выразите её через последовательности степеней или падающих степеней.
5. Для каждой последовательности  $x_n \in \mathbf{Seq}$  определим её последовательность Тейлора  $\langle x_n \rangle$  по правилу  $\langle x_n \rangle[k] := (\Delta^k x_n)[0]$ . Найдите последовательности Тейлора ваших любимых последовательностей. Например, последовательностей падающих степеней. Кроме того, докажите, что функция  $x_n \mapsto \langle x_n \rangle$  обратима и в явном виде найдите её обратную.

Обозначим через  $\mathbf{P}_\infty$  множество всех формальных бесконечных комбинаций вида

$$x_n = \alpha_0 + \alpha_1 n^1 + \alpha_2 n^2 + \dots,$$

где  $\alpha_k \in \mathbf{R}$ . Каждая такая комбинация, в действительности, опреде-

ляет числовую последовательность  $x_n \in \mathbf{Seq}$ , потому что при каждом  $k$  сумма  $x_n[k]$  будет конечна.

Например,  $P_m \subset P_\infty$  при всех  $m \geq 1$ . Докажите, что каждая последовательность в  $\mathbf{Seq}$  может быть представлена в таком виде и явно найдите соответствующие коэффициенты  $\alpha_k$ .

6. Придумайте свои обобщения полученных результатов. Например, изучите периодические или рекуррентные последовательности, их производные, интегралы и связанные с ними тождества — рассмотрите функцию  $\Delta_T(x_n)[k] := x_n[k+T] - x_n[k]$ , придумайте аналог биномиальной теоремы для падающих степеней, изучите «дифференциальные уравнения» вида  $\sum_{i=1}^m \alpha_i \Delta^i(x_n) = 0$ , исследуйте частные производные последовательностей от двух индексов  $x_{n,m}$  и кратные интегралы  $\int \int x_{n,m} dn dm$  или привлечите иные методы дискретной математики для изучения разных классов последовательностей.

## Задача 6. Геометрия и алгебра слов

Рассмотрим некоторое конечное множество  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ , которое будем называть алфавитом. Для каждого элемента  $a \in A$  введём дополнительно символ  $a^{-1}$ . Множество всех таких символов обозначим за  $A^{-1}$ . Теперь определим расширенный алфавит  $\mathbb{Q} = A \cup A^{-1}$ . Тем самым можно рассмотреть набор

$$\mathbb{Q}^* = \{\varepsilon, a_1, a_2, \dots, a_1^{-1}, a_2^{-1}, \dots, a_1 a_1, a_1 a_2, \dots, a_1 a_1^{-1}, a_1 a_2^{-1}, \dots\}$$

всех слов, которые можно получить из букв алфавита  $\mathbb{Q}$ , где  $\varepsilon$  — пустое слово длины ноль. На этом наборе определена операция приписывания слов, которую можно рассматривать как функцию  $\mathbb{Q}^* \times \mathbb{Q}^* \rightarrow \mathbb{Q}^*$ . Например,  $abaa \cdot ba = abaaba$ . Коротко будем записывать  $a^n = a \cdot \dots \cdot a$  ( $n$  раз).

Зафиксируем некоторый набор изометрий  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \subseteq \text{Isom}(\mathbf{R}^n)$  пространства  $\mathbf{R}^n$ . Мы можем комполировать данные изометрии между собой:  $xu := x \circ u$ . Для каждой изометрии  $x \in X$  по-определению есть обратное отображение  $x^{-1}$ , которое тоже будет изометрией. Теперь определена функция  $f_X : \mathbb{Q}^* \rightarrow \text{Isom}(\mathbf{R}^n)$ , которая действует следующим образом: буквам  $a_i$  сопоставляются изометрии  $x_i$ , буквам  $a_i^{-1}$  сопоставляются изометрии  $x_i^{-1}$ , пустому слову  $\varepsilon$  сопоставляется тождественное отображение  $\text{id}$ , а образ длинного слова вычисляется по рекуррентному правилу  $f_X(w_1 w_2) = f_X(w_1) \cdot f_X(w_2)$ .

На геометрическом уровне некоторые получающиеся слова будут совпадать. Например, если  $x, y$  — это переносы на векторы  $(1, 0)$  и  $(0, 1)$  в  $\mathbf{R}^2$ , то изометрии  $xu$  и  $ux$  равны. Кроме того, если  $z, w$  — это отражение относительно начала координат и поворот против часовой стрелки на  $\pi/2$  относительно нуля, то  $zx \neq xz$ ,  $z^2 = w^4 = \text{id}$  и  $y^{-1}wx = \text{id}$ . Таким образом, некоторые слова в получающемся языке должны интерпретироваться как совпадающие. Будем говорить, что два слова  $u, v \in \mathbb{Q}^*$  являются  $X$ -эквивалентными, если  $f_X(u) = f_X(v)$ . Через  $W_X$  обозначается фактормножество множества  $\mathbb{Q}^*$  по получающемуся отношению эквивалентности (такое множество однозначно задаётся каким-нибудь полным набором из попарно неэквивалентных слов, то есть таким набором, что любое слово  $v \in \mathbb{Q}^*$  эквивалентно слову из него, но никакие два разных слова из  $v$  в наборе друг другу не эквивалентны).

- 0.** Докажите, что  $X$ -эквивалентность является отношением эквивалентности на  $\mathbb{Q}^*$ .

Через  $R \subseteq \mathbb{Q}^*$  будем обозначать какой-то фиксированный набор слов, а слова из  $R$  будем называть *пустыми* (на геометрическом уровне пустые слова будут отвечать тождественным изометриям). Будем говорить, что два слова  $w, u \in \mathbb{Q}^*$  являются  $R$ -эквивалентными и писать  $u \equiv v$ , если  $u$  можно получить из  $w$  с помощью многократного применения следующей операции: между любыми двумя буквами слова  $w$  (или с краю) можно вставить (приписать) любое слово из  $\bar{R} := R \cup \{\varepsilon\} \cup \{aa^{-1} \mid a \in A\} \cup \{a^{-1}a \mid a \in A\}$ , а также из слова  $w$  можно вычеркнуть отрезок (часть), равный одному из слов в  $\bar{R}$ . Считается, что если вычеркнуть из слова само слово, то останется слово длины ноль, т.е.  $\varepsilon$ . Через  $\langle \mathbb{Q} \mid R \rangle$  обозначается фактормножество  $\mathbb{Q}^*$  по такому отношению эквивалентности.

- 0.** Докажите, что  $R$ -эквивалентность является отношением эквивалентности на  $\mathbb{Q}^*$  и проверьте, что если  $u, v, w, w' \in \mathbb{Q}^*$  и  $w \equiv w'$ , то  $uwv \equiv uw'v$ .

В этой задаче предлагается изучить алгебраические аспекты изомет-

рий, в основном возникающих как движения (чаще, отражения) из

$$\text{Fix}(\Phi) := \{\varphi \in \text{Isom}(\mathbf{R}^n) \mid \varphi(\Phi) = \Phi\},$$

сохраняющие данную геометрическую фигуру  $\Phi$  в  $\mathbf{R}^n$ .

1. Пусть  $A = \{a, b\}$  и  $R = \{a^2, b^2, abab\}$ . Тогда, например,  $bab \equiv aabab \equiv a \equiv abb \equiv \varepsilon a \varepsilon b \varepsilon b \varepsilon$ .

а) Докажите, что любое слово из  $\mathbb{Q}^*$ , в действительности,  $R$ -эквивалентно одному из слов из  $\{\varepsilon, a, b, ab\}$ .

б) Найдите пару  $(X = \{x, y\}, f_X)$  из двух изометрий  $x, y \neq \text{id}$  и функции  $f_X : \mathbb{Q}^* \rightarrow \text{Isom}(\mathbf{R}^n)$ , для которой отношения  $R$ - и  $X$ -эквивалентности совпадают. Можно ли выбрать  $x, y \in \text{Fix}(\Phi)$  для подходящей фигуры  $\Phi$  и в какой наименьшей размерности?

с) Докажите, что слова  $\varepsilon, a, b, ab$  все попарно  $R$ -неэквивалентны.

2. Пусть  $X = \{x, y\}$ , где  $x, y$  — это нетривиальный перенос на вектор  $(1, 0)$  и нетривиальная скользящая симметрия в перпендикулярном направлении соответственно.

а) Докажите, что  $xux = y$ , то есть  $xux^{-1} = \text{id}$ .

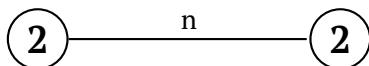
б) Пусть  $A = \{a, b\}$  и  $R = \{abab^{-1}\} \subseteq \mathbb{Q}^*$ . Определена функция  $f_X$ , переводящая  $a, b$  в  $x, y$  и продолжающаяся на все слова алфавита  $\mathbb{Q}$  по установленным в условии правилам. Докажите, что отношения  $R$ - и  $X$ -эквивалентности совпадают.

3. Рассмотрим квадратную табличку из  $m \times m$  натуральных чисел  $d_{i,j} \geq 2$ , среди которых может встретиться символ  $\infty$ . Построим по ней граф  $\Gamma = (V, E)$ , в котором  $V = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ , а вершины  $r_i, r_j$  соединены ребром в том и только в том случае, когда  $d_{i,j} \geq 3$  (включая  $\infty$ ). В вершинах графа  $\Gamma$  изображаются числа  $d_{i,i}$ , а число  $d_{i,j}$  рисуется на ребре  $(r_i, r_j)$  в том и только в том случае, когда  $d_{i,j} \geq 4$  (включая  $\infty$ ). Этими условиями исходная таблица восстанавливается по графу однозначно. Пусть  $A = V$ , а  $R \subseteq \mathbb{Q}^*$  всех слов вида  $(r_i r_j)^{d_{i,j}}$ , где  $i \neq j$ , и всех слов вида  $r_i^{d_{i,i}}$ . Если  $d_{i,j} = \infty$ , то соответствующее слово не входит в  $R$ . Будем обозначать  $G_\Gamma := \langle \mathbb{Q} \mid R \rangle$ . Решения дальнейших вопросов интересны даже при малых  $m$ .

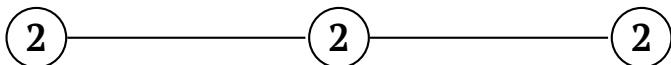
а) Опишите  $G_\Gamma$  для графа с одной вершиной с  $d_{1,1} = n$ , где  $n \geq 2$ . Найдите такую изометрию  $a$ , для которой  $a^k \neq \text{id}$  при  $1 \leq k < n$  но  $a^n = \text{id}$ . В частности, найдите пару  $(X, f_X)$ , для которой отношения  $R$ - и  $X$ -эквивалентности совпадают.



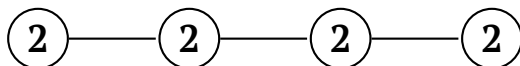
- б) Опишите  $G_\Gamma$  для графа с  $n$  изолированными вершинами, где  $d_{i,i} = 2$ , и найдите пару  $(X, f_X)$ , для которой отношения  $R$ - и  $X$ -эквивалентности совпадают. А что, вообще, происходит с алфавитом при взятии дюзъюнктивного объединения графов?
- в) Опишите  $G_\Gamma$  для графа ниже ( $n \geq 2$  или  $n = \infty$ ) и найдите пару  $(X, f_X)$ , для которой отношения  $R$ - и  $X$ -эквивалентности совпадают.



- г) Решите аналогичную задачу для графа



- е) Более общо, решите аналогичную задачу для графа из  $n$  вершин, являющегося простой ломаной.



4. По графу  $\Gamma$  построим квадратичную форму на  $\mathbf{R}^m$

$$Q_\Gamma(x_1, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{(i,j) \in E} x_i x_j.$$

Найдите соответствующие квадратичные формы для графов из предыдущих пунктов и исследуйте их на положительную определённость. Докажите, что если квадратичная форма  $Q_\Gamma$  является положительно определённой, то граф  $\Gamma$

- не содержит циклов
- не содержит вершин степени 4 и больше
- содержит не более одной вершины степени 3

Что ещё можно сказать про граф  $\Gamma$ , если соответствующая форма положительно определена?

5. Рассмотрите граф ниже и найдите пару  $(X, f_X)$ , для которой отношения  $R$ - и  $X$ -эквивалентности совпадают.



Исследуйте ситуацию, при которой такой граф состоит из  $n$  вершин и продолжается вправо ребрами с  $d_{i,i+1} = 3$ ,  $i \geq 2$ .

## Задача 7. Факториалы Бхаргавы

В 2000 году лауреат Филдсовской премии Манжул Бхаргава нашёл обобщение целочисленного факториала, в котором для каждого подмножества  $S \subseteq \mathbf{Z}$  определяется  $n!_S$ , причём,  $n!_{\mathbf{Z}} = n!$ . Оказалось, что его конструкция естественным образом обобщает наиболее интересные свойства обычного факториала. Ссылка на статью: [goo.gl/zF3p5N](http://goo.gl/zF3p5N) (The Factorial Function and Generalizations, Manjul Bhargava). В этой задаче предлагается продолжить исследование Бхаргавы в конкретном направлении. Одной из основ этого продолжения служит следующее утверждение.

1. Докажите, что любое положительное рациональное число может быть представлено в виде частного произведений факториалов (не обязательно различных) простых чисел. Например,

$$\frac{10}{9} = \frac{2! \cdot 5!}{3! \cdot 3! \cdot 3!}.$$

Напомним конструкцию Бхаргавы. Зафиксируем подмножество  $S \subseteq \mathbf{Z}$  и простое число  $p \in \mathbf{P}$ . Построим последовательность  $a_0, a_1, \dots \in S$  следующим образом: выберем произвольное  $a_0 \in S$ ; выберем элемент  $a_1 \in S$  так, чтобы разность  $a_1 - a_0$  делилась на наименьшую возможную степень числа  $p$ ; выберем элемент  $a_2 \in S$  так, чтобы разность  $(a_2 - a_0)(a_2 - a_1)$  делилась на наименьшую возможную степень числа  $p$ , и так далее. На шаге  $k$  выберем  $a_k \in S$  так, чтобы разность  $(a_k - a_0) \cdot \dots \cdot (a_k - a_{k-1})$  делилась на наименьшую возможную степень числа  $p$ . Вместе с построенной последовательностью  $a_n$  мы получаем также монотонно возрастающую последовательность соответствующих степеней  $p$

$$\nu_k(S, p) := p^{\text{ord}_p(\prod_{i=0}^{k-1} (a_k - a_i))},$$

где  $\nu_0(S, p) = 1$ . Теперь обобщённый факториал на  $S$  для  $k \geq 0$  определяется по формуле

$$k!_S := \prod_{p \in \mathbf{P}} \nu_k(S, p).$$

2. Проверьте, что последовательность  $\nu_k(S, p)$  не зависит от выбора  $a_k$ . Кроме того, докажите, что для каждого  $S \subseteq \mathbf{Z}$  в произведении выше лишь конечное число множителей не равно единице.
3. Пусть  $S = a\mathbf{Z} + b := \{an + b \mid n \in \mathbf{Z}\}$  или  $S = \{q^k \mid k \in \mathbf{Z}_{\geq 0}\}$ .

- а) Какие значения может принимать отношение факториалов  $n!_S/m!_S$  в зависимости от  $a, b, q$ ?
- б) Ответьте на предыдущий вопрос, если числа  $n = p, m = q$  предполагаются простыми.
- с) Опишите возможные значения, которые может принимать биномиальный коэффициент Бхаргавы

$$\binom{n}{k}_S := \frac{n!_S}{k!_S(n-k)!_S}.$$

- д) Ответьте на предыдущий вопрос, если числа  $n = p$  предполагаются простыми.

4. Ответьте на вопросы предыдущего пункта для произвольного  $S$ .

5. Исследуйте вопросы п. 3 (а,б) и 4, описав возможные отношения произведений факториалов Бхаргавы.

## Задача 8. О приближении кривых

Кривой на плоскости называется инъективное непрерывное отображение  $\gamma: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ . Нас будут интересовать кривые из класса  $C^\infty$  — те, для которых каждая из компонент отображения  $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \gamma_2(t))$  непрерывно дифференцируется бесконечное число раз.

Пусть  $\zeta, \gamma: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ . Кривую  $\zeta$  будем называть  $\varepsilon$ -близкой к кривой  $\gamma$ , если

$$\zeta(a) = \gamma(a), \quad \zeta(b) = \gamma(b), \quad \forall t \in [a, b] \quad \exists s \in [a, b]: \text{dist}(\zeta(t), \gamma(s)) < \varepsilon.$$

Кривую  $\zeta$  будем называть  $\varepsilon$ -приближением  $\gamma$ , если

$$\zeta(a) = \gamma(a), \quad \zeta(b) = \gamma(b), \quad \forall t \in [a, b] \quad \text{dist}(\zeta(t), \gamma(t)) < \varepsilon.$$

Пусть  $\gamma: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$  — регулярная кривая. Её  $\varepsilon$ -длиной называется число

$$L_\varepsilon(\gamma) = \inf \{L(\zeta) \mid \zeta - \varepsilon\text{-приближение } \gamma\}.$$

1. Докажите, что у регулярных кривых любой длины бывают сколь угодно длинные регулярные приближения. Иными словами, для любого числа  $\mathcal{D} > 0$  и для любой регулярной кривой  $\gamma$  существует регулярная кривая  $\zeta: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$  с длиной  $L(\zeta) > \mathcal{D}$ , являющаяся её  $\varepsilon$ -приближением.
2. Докажите, что для любой регулярной кривой  $\gamma$  существует константа  $\varepsilon_0$  такая, что при  $\varepsilon < \varepsilon_0$  инфимум из определения  $\varepsilon$ -длины совпадает с инфимумами длин (а) кривых,  $\varepsilon$ -близких к  $\gamma$ ; (б) ломаных,  $\varepsilon$ -близких к  $\gamma$ . Укажите, как найти  $\varepsilon_0$ .
3. Пусть  $\gamma$  — регулярная кривая, про которую известно, что её кривизна ограничена сверху числом  $\frac{1}{r}$ . При  $\varepsilon < \frac{1}{2}$  дайте как можно более точную нижнюю оценку на  $L_\varepsilon(\gamma)$  (и проверьте, достигается ли она).
4. Для регулярной кривой  $\gamma$  докажите, что  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} L_\varepsilon(\gamma) = L(\gamma)$ . Докажите то же самое для произвольной непрерывной кривой конечной длины.

Перейдём от кривых к ломаным на плоскости. Пусть  $\mathcal{C}_n$  — множество несамопересекающихся ломаных с вершинами в точках множества  $\frac{1}{n}\mathbb{Z} \times \frac{1}{n}\mathbb{Z}$  и рёбрами длины  $\frac{1}{n}$ . Несложно перенести определение  $\varepsilon$ -близости на случай ломаных — расстояние  $\text{dist}$  между двумя точками на плоскости нам теперь будет удобнее определить как

$$\text{dist} \left( (x, y), (z, t) \right) = \max\{|x - z|, |t - y|\} \quad (\text{проверьте, что это метрика}).$$

Дана регулярная кривая  $\gamma: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$ , причем  $\gamma(0), \gamma(1) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ . Её  $n$ -пикселизацией (обозначим через  $\gamma_n$ ) будем называть кратчайшую ломаную из  $\mathcal{C}_n$ , которая  $1/n$ -близка к  $\gamma$ . Обозначим  $\mathcal{P}_n(\gamma) = L(\gamma_n)$ .

5. Для данной ломаной  $\lambda \in \mathcal{C}_1$  и чисел  $n, \varepsilon \in \mathbb{N}$  как можно более точно оцените длину самой короткой и самой длинной ломаных из  $\mathcal{C}_n$ ,  $\varepsilon$ -близких к  $\lambda$  (и проверьте, достигаются ли ваши оценки).
6. Для произвольной регулярной кривой  $\gamma$  оцените  $\mathcal{P}_n(\gamma)$  и найдите  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{P}_n(\gamma)$ .
7. Предложите и исследуйте свои обобщения данной задачи: например, можно рассмотреть другие метрики и другие сетки допустимых вершин на плоскости.

## Задача 9. Экстремальные тетраэдры

Задачи на плоскости.

1. Среди всех треугольников, вписанных в единичную окружность, найдите треугольник с
  - а) максимальным периметром,
  - б) максимальной площадью,
  - с) максимальным радиусом вписанной окружности.
2. Шириной треугольника в направлении  $\alpha$ , где  $\alpha \in [0, \pi]$ , называется величина  $w(\alpha)$ , равная длине проекции треугольника на прямую, образующую с осью абсцисс угол  $\alpha$ . Средней шириной треугольника называется величина

$$\frac{1}{\pi} \int_0^\pi w(\alpha) d\alpha.$$

- а) Придумайте, как по периметру треугольника найти его среднюю ширину.
- б) Среди всех треугольников, вписанных в единичную окружность, найдите треугольник с максимальной средней шириной.

Задачи в  $\mathbb{R}^3$ .

3. а) Среди всех тетраэдров, вписанных в единичную сферу, найдите тетраэдр с максимальным объемом.
- б) Докажите следующее обобщенное тождество параллелограмма: если  $X_1, \dots, X_n$  — векторы в  $\mathbb{R}^3$ , где  $n$  — натуральное число, то

$$\sum_{1 \leq i < j \leq n} \|X_i - X_j\|^2 + \left\| \sum_{i=1}^n X_i \right\|^2 = n \sum_{i=1}^n \|X_i\|^2.$$

- с) Среди всех тетраэдров, вписанных в единичную сферу, найдите тетраэдр с максимальной суммой длин ребер.
- д) Пусть дан тетраэдр в  $\mathbb{R}^3$ . Известно, что любое его ребро ортогонально плоскости, проходящей через середину этого ребра и оставшиеся две вершины тетраэдра. Докажите, что тетраэдр правильный.
- е) Среди всех тетраэдров, вписанных в единичную сферу, найдите тетраэдр с максимальной площадью поверхности (суммой площадей граней).

f) Среди всех тетраэдров, вписанных в единичную сферу, найдите тетраэдр с максимальным радиусом вписанной сферы.

4. Пусть тетраэдр  $ABCD$  вписан в единичную сферу с центром  $O$ . Суммой углов обзора тетраэдра называется величина

$$\sphericalangle AOB + \sphericalangle AOC + \sphericalangle AOD + \sphericalangle BOC + \sphericalangle BOD + \sphericalangle COD.$$

Среди всех тетраэдров, вписанных в единичную сферу, найдите тетраэдр с максимальной суммой углов обзора.

5. а) Используя полярные координаты в  $\mathbb{R}^3$ , обобщите понятие средней ширины треугольника на трехмерный случай (для тетраэдра).

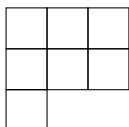
б) Среди всех тетраэдров, вписанных в единичную окружность, попробуйте найти тетраэдр с максимальной средней шириной.

6. Многомерным обобщением треугольника и тетраэдра в  $\mathbb{R}^n$  является симплекс — многогранник, у которого  $n + 1$  вершина. Попытайтесь пункты 3) – 5) обобщить на многомерный случай.

## Задача 10. Динамические системы

Зафиксируем натуральное число  $n$  и рассмотрим множество  $\mathbf{Z}/n\mathbf{Z}$  возможных остатков при делении на  $n$ . В этой задаче предлагается изучить некоторые разбиения  $\mathbf{Z}/n\mathbf{Z}$  на подмножества (классы эквивалентности) и исследовать динамику этих разбиений при малых изменениях задающих их параметров. Изменения при этом будут контролироваться некоторой функцией  $f: \mathbf{Z} \rightarrow \mathbf{Z}$ . Каждое разбиение  $\mathbf{Z}/n\mathbf{Z}$  задаёт представление числа  $n$  в виде суммы неотрицательных слагаемых, а следовательно, задаёт диаграмму Юнга соответствующего порядка. Интерес вызывает как количество строчек в этой диаграмме, так и их длина.

Рассмотрим наименьшее отношение эквивалентности на  $\mathbf{Z}/n\mathbf{Z}$ , при котором каждый остаток  $[x]$  эквивалентен остатку  $[f(x)]$ . В зависимости от  $f$  и  $n$  найдите число всех классов, на которые полученное отношение делит  $\mathbf{Z}/n\mathbf{Z}$ . Например, при  $n = 7$  функция  $f(x) = 4x + 1$  задаёт разбиение  $\mathbf{Z}/7\mathbf{Z} = \{[0], [1], [5]\} \cup \{[2]\} \cup \{[3], [6], [4]\}$  и диаграмму



Интерес в представляют как гипотезы и наблюдения, связанные с динамикой ответов, так и строгие доказательства. Какая трансформация  $f$  вносит большее изменение: умножение на два  $f(x) \mapsto 2f(x)$  или прибавление единицы  $f(x) \mapsto f(x) + 1$ ? Предлагается проводить исследование в следующем порядке:

1. Изучите случаи  $f_a(x) = ax$ , где  $a$  — фиксированное целое число, и  $f(x) = x^2$ .
2. Изучите случай  $f_{a,b}(x) = ax + b$ , начиная с совсем малых целых  $b$ . Опробуйте оба подхода: фиксируйте  $a, b$  и меняйте  $n$  или фиксируйте  $n$  и меняйте  $a, b$ , а затем изучите форму получающихся диаграмм.
  - а) Траекторией  $x$  называется последовательность  $x, f_{a,b}(x), f_{a,b}(f_{a,b}(x)), \dots$ . В предположении  $(a, n) > 1$ , опишите остатки  $[x]$ , траектории которых образуют цикл.
  - б) Постарайтесь описать траекторию остатка  $[0]$ .
  - в) Постарайтесь найти те характеристики получающихся диаграмм Юнга, которые поддаются вычислению в зависимости от  $n, a, b$ .
  - г) Фиксируйте  $a, b$  и опишите чезаровские средние (по  $n$ ) мощностей получающихся классов эквивалентности. Затем попробуйте брать средние по другой переменной ( $a$  или  $b$ ).
3. Изучите случаи  $f_m(x) = x^m$  и  $f(x) = x^2 + 1$ .
4. Выясните, для каких полиномиальных функций  $f$  искомые числа классов эквивалентности и их размеров поддаются явному вычислению, и проведите соответствующее исследование. Например, выясните, какие замены функции  $f \mapsto g$  приводят к незначительным изменениям ответов.

## Задача 11. ПОЗ-коды

*Сотрите мне память (Н.В. Гоголь. Вий)  
Стереть нельзя исправить (крылатое выражение)*

Возможно, вам знакома перфокарта — картонка, в которой можно пробивать отверстия. С помощью перфокарты удобно хранить информацию в машиночитаемом виде: есть отверстие — 1, нет — 0. У перфокарты

есть важное свойство: любой 0 легко меняется на 1, но обратная замена крайне затруднена. Память с таким свойством называют *памятью с однократной записью (ПОЗ)*, или по-английски *Write-Once Memory (WOM)*. Один бит такой памяти называется *витом*.

Ограничение казалось бы не позволяет такую память перезаписывать несколько раз, но в 1982 году Р.Ривест и А.Шамир в статье «How to Reuse a “Write-Once” Memory» предложили кодировку, позволяющую ценой некоторого увеличения объёма носителя предоставить возможность перезаписи информации.

Например, с помощью трёх витов оказывается возможно записать некоторое двухбитовое число, а потом однократно заменить его на другое:

число	кодировка для первой записи	кодировка для повторной записи
00	000	111
01	100	011
10	010	101
11	001	110

Допустим, можно сперва записать 10, используя код 010, а потом записать число 01 на его место, заменив третий вит на 1 и получив код 011.

Недавно эта область исследований получила второе дыхание в связи с распространением флэш-памяти (обладающей очень похожими свойствами). Ниже мы предлагаем вам задачи, связанные с данной областью:

1. Представим себе проездной билет, стоимость которого (целое число от 0 до  $n - 1$ ) запоминается с помощью  $k$  витов — скажем, компостируется при покупке. Предложите кодировку, позволяющую исключить увеличивающее стоимость изменение витов (докомпостирование билета) после покупки. Приведите по возможности точные верхние и нижние оценки на число  $k$  для вашей кодировки. Также предложите теоретические верхние и нижние оценки на количество витов в кодировках с такими свойствами.
2. В условиях п.1 предложите кодировку, исключающую любое изменение стоимости после покупки. Иными словами, кодировку, в которой любые дополнительные изменения витов делают код любого числа некорректным (не соответствующим никакому числу). Также приведите оценки для предложенной кодировки и теоретические оценки.



3. Представим себе проездной билет, в котором используется ПОЗ для хранения числа поездок. После каждой поездки число уменьшается на 1, пока не достигнет нуля. Предложите кодировку, позволяющую хранить эту информацию по возможности максимально эффективно по памяти. Дайте как теоретические, так и достигаемые вашей кодировкой верхние и нижние оценки необходимого количества витов. Убедитесь, что предложенный вами код не позволяет увеличить количество поездок в процессе перезаписи значений.
4. Пусть в ПОЗ хранится не число поездок, а оплаченная стоимость в рублях, при этом при поездке со счёта снимается либо 40, либо 45 рублей (в зависимости, например, от вида транспорта). Возможно ли с учётом этого ограничения сделать кодировку более эффективной по памяти и улучшить оценки из п.3?
5. Обобщите результат из п.4 на случай произвольного набора стоимостей поездки.
6. Рассмотрим ситуацию, когда мы записываем события на длинную ленту. Скажем, речь может идти о показаниях скорости — увеличилась ли она на 1 от предыдущего наблюдения, уменьшилась ли на 1 или осталась прежней. Сравнительно легко иметь дело с ситуациями, когда каждое следующее событие имеет ровно  $2^k$  значений — тогда мы про каждое событие будем дописывать к ленте ровно  $k$  витов и сразу переходить к следующему. Однако, можете ли вы предложить более эффективную по памяти кодировку в той ситуации, когда количество вариантов, например, равно 3? Естественно, вы можете, помимо добавления новых витов, исправлять какие-то из предыдущих.
7. Рассмотрите п.6 для произвольного количества вариантов значений, добавляемых на каждом шаге.
8. Предложите какие-нибудь свои аналогичные задачи и кодировки, подходящие для их решения. Этот пункт также подходит для изложения кодировок, придуманных вами в процессе решения задачи, но не подошедших под условия.

# Задачи 2017 года

## Задача 1. Уйдём на Север

Снежная Королева возвращается обратно на Север и собирает чемоданы. За то время, что она провела вне дома, она накопила множество льдинок самой разной формы и хочет их все взять с собой. Помогите Снежной Королеве быстрее собрать вещи.

1. У Снежной Королевы есть стеллаж с плоскими квадратными чемоданами и множество льдинок треугольной формы, которыми она дорожит. Какова наименьшая сторона плоского квадратного чемодана, в которую поместятся одновременно две плоские льдинки в форме равнобедренных прямоугольных треугольников с длинами катетов  $a$  и  $b$ , соответственно? А две льдинки в форме равносторонних треугольников? В плоские чемоданы льдинки укладываются только в один слой.



Рис. 1: Две треугольные льдинки в не самом подходящем плоском квадратном чемодане

2. Настала очередь прозрачных картин изо льда. В какой плоский квадратный чемодан поместятся две ледяные квадратные картины со сторонами  $a$  и  $b$ , соответственно?
3. Стеллаж с квадратными чемоданами опустел. Но в ящике комода обнаружили чемоданы самых разных форм. Первыми на глаза попала стопка с несчётным числом плоских прямоугольных чемоданов. Как выглядят прямоугольные чемоданы наименьшей площади, в которые можно поместить льдинки уже рассмотренных форм?
4. Для ускорения сборов удобнее класть более двух льдинок в чемодан. В какой прямоугольный чемодан лучше всего убрать 3 одинаковые равносторонние льдинки? А 4? Что будет в случае льдинок — прямоугольных треугольников?

5. Кубические чемоданы отлично подходят для упаковки объёмных льдинок-тетраэдров. Решите задачу для различных пар таких льдинок.
6. Рассмотрите льдинки и чемоданы других форм. Например, круглые льдинки-тарелки и треугольные чемоданы.

## Задача 2. Вас снимают

Пусть  $I \subseteq \mathbb{R}$  является объединением непересекающихся отрезков на прямой. Обозначим за  $L(I)$  длину множества  $I$ , то есть сумму длин соответствующих отрезков. Подмножество плоскости  $A$  будем называть фигурой, если оно ограничено, замкнуто и его пересечение с любой прямой есть объединение конечного числа отрезков (определения ?? и ?? ниже). В частности, любой многоугольник является фигурой. Зафиксируем некоторую декартову систему координат на плоскости. Для фигуры  $A$  определим её  $x$ -снимок, как функцию  $f_x: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , которая по точке  $t$  на прямой  $OX$  вычисляет длину пересечения  $A$  с прямой, проходящей через  $t$  и перпендикулярной  $OX$

$$f_x(t) = L(A \cap \{(t, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y \text{ любое}\}).$$

Аналогично определим  $y$ -снимок фигуры  $A$  как

$$f_y(t) = L(A \cap \{(x, t) \in \mathbb{R}^2 \mid x \text{ любое}\}).$$

1. Какая фигура обладает следующими  $x$ - и  $y$ -снимками:

$$f_x(t) = f_y(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \frac{7t}{12}, & 0 \leq t \leq 3 \\ \frac{21}{12}, & 3 \leq t \leq 4 \\ -\frac{7t}{12} + \frac{49}{12}, & 4 \leq t \leq 8 \\ 0, & 8 \leq t \end{cases} \quad ?$$

2. Найдите способ восстановить фигуру  $A$ , а также варианты её расположения по  $x$ - и  $y$ -снимкам, если известно, что
  - а)  $A$  — некоторый прямоугольник;
  - б)  $A$  — некоторый треугольник;

в)  $A$  — некоторый четырёхугольник.

Можно ли обойтись только одним снимком?

3. Приведите пример двух неравных фигур на плоскости, имеющих одинаковые  $x$ - и  $y$ -снимки.
4. Пусть  $A$  некоторая фигура. Можно ли восстановить и, если можно, то как, по  $x$ - и  $y$ -снимкам следующую информацию:
  - а)  $A$  имеет площадь  $S$ ;
  - б)  $A$  является невыпуклой фигурой (см. определение ??);
  - в)  $A$  является многоугольником с  $n$  вершинами;
  - г)  $A$  содержит фиксированную точку  $(x_0, y_0)$ ?

Можно ли добиться ответов на эти вопросы, если заранее известна дополнительная информация про  $A$ ? Например, если известно, что  $A$  выпуклая и центрально-симметричная фигура?
5. Повернём исходную систему координат относительно начала отсчёта на угол  $\alpha$  против часовой стрелки.  $x$ -снимок в новой системе координат назовём  $\alpha$ -снимком. Так например,  $0$ -снимок это  $x$ -снимок,  $\frac{\pi}{2}$ -снимок это  $y$ -снимок. Исследуйте предыдущие пункты, если вместо  $x$ - и  $y$ - снимков даны  $\alpha$ - и  $\beta$ -снимки, для некоторых неравных углов  $\alpha$  и  $\beta$ ? Можно ли узнать дополнительную информацию (например, восстановить любую фигуру), если даны три разных снимка?

### Задача 3. Целые структуры

1. Пусть даны два целых числа  $a$  и  $b$ . Множеством, подчинённым  $a$  и  $b$  назовём  $S$ , подмножество в  $\mathbb{Z}$ , удовлетворяющее свойствам:
  - а)  $a, b \in S$ ;
  - б) Для любого  $x \in S$  число  $-x$  лежит в  $S$ ;
  - в) Для всех  $x$  и  $y$  из  $S$  число  $ax + by$  также лежит в  $S$ .

Пусть  $a = 2$ , а  $b = 3$ . Покажите, что любое подчинённое 2 и 3 множество  $S$  обязательно содержит 1.
2. Опишите наименьшее множество  $S$ , подчинённое  $a$  и  $b$ , если  $a = b = 1$ . Что будет, если  $a = 2, b = 3$ ?
3. Рассмотрите аналогичную задачу для  $a = 4, b = 5$ .
4. При каком условии на  $a$  и  $b$  в любом  $a, b$ -подчинённом множестве  $S$  найдётся число, имеющее остаток  $k$  по модулю  $n$  для всех  $0 \leq k < n$ .

5. Пусть  $a$  и  $b$  взаимно просты. Покажите, что любое подчинённое  $a$  и  $b$  множество содержит 1.
6. Натуральной плотностью множества  $A \subseteq \mathbb{Z}$  назовём предел отношения

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|\{x \in A \mid -n \leq x \leq n\}|}{2n},$$

если этот предел существует. Верно ли, что для не взаимно простых  $a$  и  $b$  размер наименьшего подчинённого  $a$  и  $b$  множества имеет натуральную плотность 0?

## Задача 4. Задача №4 Буйство красок

Известный художник Петров имеет следующую манеру письма: он разбивает квадратный холст  $n \times n$  на квадратики  $1 \times 1$ , после чего каждый квадратик закрашивает в один из  $k$  цветов, имеющихся в наличии. Так как на картине не указан верх и низ, то искусствоведы и сам Петров считают две картины, отличающиеся поворотом на  $90^\circ$ , одинаковыми.

1. В детстве Петров писал на холсте  $2 \times 2$ . Известно, что за это время он написал более 100, но менее 200 различных картин, при этом с холстов  $2 \times 2$  на большие он перешёл после того, как написал картины размера  $2 \times 2$  всеми доступными ему способами. Сколько красок было у Петрова в детстве? Сколько в точности картин  $2 \times 2$  он написал?

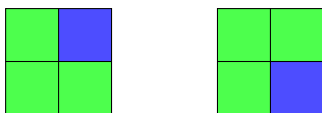


Рис. 2: Две неразличимые детские картины Петрова  $2 \times 2$  на двух цветах

2. Обретя популярность, Петров переключился на масштабные проекты с холстами  $n \times n$ ,  $n \geq 3$  и числом красок  $k$ . Найдите асимптотику или формулу для числа различных картин, которые мог написать Петров на полотнах  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ , при  $k \rightarrow \infty$ . Оцените число возможных картин Петрова при других  $n$  или дайте точную формулу.
3. Для систематизации картин Петрова искусствоведы предложили несколько классификаций, основанных на том, что две картины Петрова

не стоит различать, если они отличаются цепочкой определённых преобразований. Найдите конкретные значения, оцените при больших  $n$  и  $k$  или дайте точную формулу числа работ Петрова по классификациям, основанным на преобразованиях:

- а) Поворот на  $90^\circ$  и отражения относительно осей симметрии квадрата;
- б) Преобразования из пункта а) и преобразование, сдвигающее все строчки квадрата, кроме первой, на 1 вниз, а нижнюю строчку ставящее наверх.
- в) Преобразования из пункта а) и преобразования, меняющие цвета на картине: цвет  $i$  на цвет  $j$ , цвет  $j$  на цвет  $i$ , и не меняющее остальные цвета. Назовём такие преобразования элементарными перекрашиваниями.
- г) Преобразования из пункта а) и преобразования, позволяющие в одном из столбцов сдвинуть все квадратики на 1 по циклу.

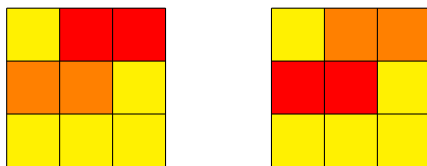


Рис. 3: Картины, отличающиеся заменой оранжевого и красного цветов

4. Художник Иванов решил превзойти Петрова и стал разбивать равносторонний треугольник со стороной  $n$  на треугольники со стороной 1 и раскрашивать их в  $k$  цветов. Исследуйте аналогичный предыдущим пунктам вопрос. В частности, рассмотрите классификации, разрешающие преобразования:

- а) Поворот на  $120^\circ$ ;
- б) Поворот на  $120^\circ$  и отражения относительно осей симметрии треугольника;
- в) Преобразования из пункта б) и элементарные перекрашивания;
- г) Преобразования из пункта а) и преобразование, сдвигающее по циклу цвета в одном горизонтальном ряду большого треугольника.

5. Рассмотрите другие, в том числе трёхмерные, разбиения и их раскраски. Придумайте другие классификации.

## Задача 5. Дискретная непрерывность

Будем говорить, что два целых числа  $a$  и  $b$  соседние, если  $|a - b| \leq 1$ . Пусть  $I$  — некоторое подмножество внутри целых чисел. Отображение  $f: I \rightarrow \mathbb{Z}$  назовём дискретно непрерывным, если для любых двух соседних чисел  $a, b \in I$  их образы  $f(a)$  и  $f(b)$  тоже соседние.

1. Пусть  $a < b$  — два целых числа. Целочисленным отрезком  $[a, b]$  будем называть подмножество целых чисел  $[a, b] = \{x \in \mathbb{Z} \mid a \leq x \leq b\}$ . Пусть дано дискретно-непрерывное отображение  $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ . Покажите, что для любого целого числа  $x \in [f(a), f(b)]$  существует  $c$ , такое, что  $a \leq c \leq b$  и  $f(c) = x$ .

2. Пусть  $n \in \mathbb{N}$  — некоторое натуральное число. Рассмотрим функцию  $\rho_1(x, y): \mathbb{Z}^n \times \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , заданную по правилу

$$\rho_1(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \text{ где } x = (x_1, \dots, x_n), \text{ а } y = (y_1, \dots, y_n).$$

Будем говорить, что точки  $x, y \in \mathbb{Z}^n$  соседние, если  $\rho_1(x, y) \leq 1$ . Пусть  $A$  — подмножество в  $\mathbb{Z}^n$ , а  $k \in \mathbb{N}$ . Отображение  $f: A \rightarrow \mathbb{Z}^k$  назовём дискретно-непрерывным, если для любых соседних  $x, y \in A$  их образы  $f(x)$  и  $f(y)$  соседние в  $\mathbb{Z}^k$ . Для каждого натурального числа  $m$  определим множества

$$D_m^n = \{x \in \mathbb{Z}^n \mid |x_i| \leq m\} \text{ и } S_m^{n-1} = \{x \in D_m^n \mid \exists i \leq n \ |x_i| = m\}.$$

Пусть дискретно-непрерывное отображение  $f: S_m^1 \rightarrow \mathbb{Z}^2$ , а  $x \in \mathbb{Z}^2$  не лежит в  $f(S_m^1)$ . Для любого луча  $l$ , исходящего из точки  $x$  и не содержащего точек  $f(S_m^1)$ , можно определить число  $i_{l,f}$  его пересечений с ломаной, построенной по  $f$ . Сделаем это следующим образом:

$$i_{l,f} = \frac{1}{2} \left| \{(a, b) \mid a, b \in S_m^1, \rho_1(a, b) = 1 \text{ и } l \text{ пересекает отрезок, соединяющий } f(a) \text{ и } f(b)\} \right|$$

Число  $\frac{1}{2}$  появляется из-за того, что одно и тоже пересечение соответствует и паре  $(a, b)$ , и паре  $(b, a)$ . Покажите, что чётность  $i_{l,f}$  не зависит от выбора  $l$  и, следовательно, является характеристикой точки  $x$ .

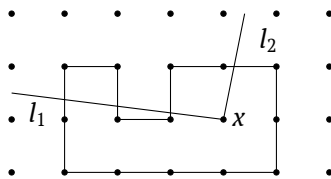


Рис. 4: Ломаная и два луча, исходящие из одной точки, с  $i_{l,f} = 3$  и  $i_{l_2,f} = 1$

3. Точку  $x \in \mathbb{Z}^2$ , не лежащую в  $f(S_m^1)$ , назовём внутренней по отношению к  $f$ , если  $i_{l,f}$  нечётно, и внешней, если  $i_{l,f}$  чётно. Пусть дано дискретно-непрерывное отображение  $g: D_m^2 \rightarrow \mathbb{Z}^2$ . Положим  $f = g|_{S_m^1}$  — сужение отображения  $g$ . Покажите, что для любой  $f$ -внутренней точки  $x$  существует  $y \in D_k^2$ , что  $g(y) = x$ .
4. Определим метрические пространства (см. метрика)  $\mathbb{Z}^{n,p}$ , где  $p = \inf ty$ , или  $p \geq 1$  — вещественное число, следующим образом:

$$\mathbb{Z}^{n, \text{inf ty}} = (\mathbb{Z}^n, \max\{|x_i - y_i| : i \in \overline{1, n}\}) \text{ и при } p \text{ вещественном } \mathbb{Z}^{n, p} = (\mathbb{Z}^n, \rho_p),$$

где  $\rho_p(x, y) = (\sum_{1 \leq i \leq n} |x_i - y_i|^p)^{1/p}$ . Заметим, что если  $n = 1$ , то все метрики  $\rho_p$  совпадают, поэтому при  $n = 1$  индекс  $p$  можно опустить. Естественным образом, расстояние ограничивается и на подмножества указанных метрических пространств. Определение понятия  $L$ -липшицевого отображения можно найти в конце (см. определение ??).

- а) Покажите, что 1-липшицевы отображения из  $\mathbb{Z}^{n,1} \rightarrow \mathbb{Z}^{k,1}$  являются дискретно-непрерывными и наоборот.
- б) Опишите все пары чисел  $L_1$  и  $L_2$ , такие что отображение  $f: \mathbb{Z}^{2,p} \rightarrow \mathbb{Z}^{2,p}$  липшицево с константой  $L_1$  тогда и только тогда, когда оно  $L_2$ -липшицево.
- в) Исследуйте взаимосвязь между условиями липшицевости для отображений  $f: \mathbb{Z}^2 \rightarrow \mathbb{Z}^2$  в метриках  $\rho_p$  и  $\rho_q$  с различными константами  $L$ .
- Пусть  $L$  — натуральное число. Покажите, что для любого  $L$ -липшицевого отображения  $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$  и любого целочисленного отрезка  $[a, b]$

$$\frac{|f([a, b])|}{|\text{conv}(f([a, b]))|} \geq \frac{1}{L},$$



где  $|f([a, b])|$  — это количество точек в образе  $[a, b]$ , а  $\text{conv}(f([a, b]))$  — наименьший отрезок, содержащий  $f([a, b])$ .

6. Зададим расстояние на  $D_m^n$  с помощью метрики  $\rho_1$ . Сформулируйте и докажите аналог пункта 6 задачи для  $L$ -липшицевых отображений из  $D_m^2 \rightarrow \mathbb{Z}^{2,q}$ .
7. Обобщите все указанные теоремы на случай размерности больше 2. Опишите все  $L$ -липшицевы биекции из  $\mathbb{Z}^{n,p} \rightarrow \mathbb{Z}^{n,q}$  для маленьких  $L$ .

## Задача 6. Гипергеометрическая прогрессия

1. Рассмотрим следующее рекуррентное соотношение:

$$p(n)a_n = q(n)a_{n-1}, \text{ для } n > n_0 \text{ и } a_{n_0} = \lambda,$$

где  $\lambda$  — некоторое вещественное число, а  $p(n)$  и  $q(n)$  — некоторые многочлены с вещественными коэффициентами. Выведите явную формулу для его решения.

2. Последовательность из предыдущего пункта назовём гипергеометрической прогрессией. Будем говорить, что многочлены  $p$  и  $q$  определяют эту прогрессию. Являются или нет частными случаями гипергеометрической прогрессии: а) геометрическая прогрессия; б) арифметическая прогрессия; в)  $a_n = n!$ ; г)  $a_n = C_n^k$  для фиксированного  $k$ ; д)  $a_n = \frac{(-1)^{n+1}}{2}$ ? Если да, то какие многочлены их задают?

3. Рассмотрим рекуррентное соотношение

$$p(n)a_n = q(n)a_{n-1} + r(n)a_{n-2},$$

где  $p(n)$ ,  $q(n)$ ,  $r(n)$  — некоторые многочлены. При каких  $p$ ,  $q$  и  $r$  у такого рекуррентного соотношения нет решений в виде гипергеометрической прогрессии?

4. Исследуйте предыдущий вопрос для соотношения

$$p_0(n)a_n = p_1(n)a_{n-1} + p_2(n)a_{n-2} + \dots + p_k(n-k)a_{n-k},$$

где  $k$  фиксировано,  $p_i(n)$  — некоторые многочлены.

5. Пусть даны две гипергеометрические прогрессии  $a_n$  и  $b_n$ . При каких условиях на многочлены, задающие  $a_n$  и  $b_n$ , существуют числа  $r_1(n)$  и  $r_2(n)$ , что  $r_1(n)a_n + r_2(n)b_n = 0$  для всех  $n$ ?
6. Исследуйте предыдущий вопрос для большего числа гипергеометрических прогрессий.
7. Пусть  $a_n$  и  $b_n$  — две последовательности. Определим последовательность  $a * b_n$  равенством

$$a * b_n = \sum_{0 \leq i \leq n} a_i b_{n-i}.$$

Предположим, что  $a_n$  и  $b_n$  — гипергеометрические прогрессии. Всегда ли последовательность  $a * b_n$  есть конечная сумма гипергеометрических прогрессий? Если нет, то какие условия надо наложить на  $a_n$  и  $b_n$ , чтобы это было верно? Начните со случая геометрических прогрессий.

8. Исследуйте существование решений в виде гипергеометрических функций для рекуррентного соотношения

$$p(0, n)a_n = p(1, n)a_{n-1} + \dots + p(k, n-k)a_{n-k} + \dots + p(n_0, n-n_0)a_{n_0},$$

где  $p(n, k)$  — гипергеометрическая функция по  $n$  и по  $k$ .

## Задача 7. Зависимые матрицы

1. Пусть  $B$ ,  $C$  и  $D$  матрицы  $2 \times 2$  с коэффициентами из  $\mathbb{R}$  (см. определение ?? ниже). Линейным уравнением в матрицах относительно матрицы  $X$  назовём уравнение вида:

$$CXD = B.$$

Матрица  $A \in M_2(\mathbb{R})$  называется его решением, если

$$C \cdot A \cdot D = B,$$

где  $\cdot$  обозначает произведение матриц (см. определение ??). Обозначение произведения для краткости будем опускать. Решите уравнение:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} X \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & 1 \\ 5 & 1 \end{pmatrix}.$$

2. Покажите, что уравнение  $CXD = B$  разрешимо тогда и только тогда, когда разрешимы уравнения  $CX = B$  и  $XD = B$ . При каких условиях на  $C$  и  $D$  уравнение  $CXD = B$  разрешимо при любых  $B$ ?

3. Естественным образом, можно определить обобщённые линейные уравнения:

$$C_1XD_1 + C_2XD_2 + \dots + C_nXD_n = B.$$

Исследуйте разрешимость таких уравнение для любых  $B$  и решите обобщённое линейное уравнение:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} X \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} X \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & 1 \\ 5 & 2 \end{pmatrix}.$$

4. Последовательность матриц вида  $A_n = C^n A_0$  назовём геометрической прогрессией. Опишите все решения линейного рекуррентного соотношения  $A_{n+1} = CA_n D$ , являющиеся геометрическими прогрессиями. Можно ли любое решение такого рекуррентного соотношения представить в виде суммы геометрических прогрессий? В частности, ответьте на указанные вопросы для соотношения

$$A_{n+1} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} A_n \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

5. Исследуйте аналогичный вопрос для рекуррентных соотношений вида  $A_{n+1} = CA_n + A_n D$ .

6. Рассмотрите рекуррентное соотношение  $A_{n+1} = C_1 A_n D_1 + C_2 A_n D_2$ . Исследуйте существование у этого рекуррентного соотношения решения в виде геометрической прогрессии. В частности, опишите все решения, являющиеся геометрическими прогрессиями для соотношения

$$A_{n+1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} A_n \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} A_n \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

7. Исследуйте выразимость в геометрических прогрессиях решений линейных рекуррентных соотношений вида

$$A_{n+1} = C_1 A_n D_1 + C_2 A_{n-1} D_2,$$

а также линейных рекуррентных соотношений большего порядка.

## Задача 8. Можно ли разрезать?

1. Пусть  $\varphi$  — некоторый угол. Покажите, что

$$\cos n\varphi = p(\cos \varphi),$$

где  $p(x)$  — это многочлен степени  $n$  с целыми коэффициентами.

2. Покажите, что угол между гипотенузой и катетом в прямоугольном треугольнике со сторонами 3, 4, 5 не равен:

а)  $\frac{k\pi}{5}$ , где  $k$  — целое; б)  $\frac{k\pi}{l}$ , где  $k$  и  $l$  — целые неотрицательные числа.

3. Можно ли так изобразить равносторонний треугольник на координатной плоскости, чтобы координаты вершин являлись рациональными числами?

4. Опишите все треугольники с рациональными координатами вершин и углами вида  $\frac{k\pi}{l}$ , где  $k$  и  $l$  — целые неотрицательные числа. Такие углы в дальнейшем будем называть рациональными.

5. Разрезанием многоугольника  $P$  назовём такой набор многоугольников  $P_i$ , где  $1 \leq i \leq n$  внутри  $P$ , что  $P = \bigcup_{1 \leq i \leq n} P_i$  и при  $i \neq j$  многоугольники  $P_i$  и  $P_j$  могут пересекаться лишь по точкам на границе. Пусть дан прямоугольник  $ABCD$  со сторонами  $a$  и  $b$ . Опишите все  $a$  и  $b$ , при которых его можно разрезать на три треугольника с рациональными углами. Приведите примеры разрезаемых и неразрезаемых прямоугольников.

6. Найдите критерий, при котором многоугольник может быть разрезан каким-либо образом на треугольники с рациональными углами.

7. Два многоугольника  $P$  и  $Q$  с рациональными углами, назовём рационально равноставленными, если существует разрезание  $\{P_i\}_{i \in \overline{1, n}}$  для  $P$  и разрезание  $\{Q_i\}_{i \in \overline{1, n}}$  для  $Q$ , такие что фигуры  $P_i$  и  $Q_i$  равны и имеют рациональные углы для всех  $i$ . Например,

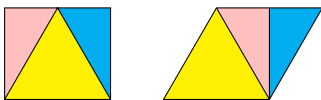


Рис. 5: Разрезание на попарно равные треугольники с рациональными углами.

Найдите необходимые и достаточные условия рациональной равноставленности двух фигур. Приведите примеры рационально равноставленных и не рационально равноставленных многоугольников.

## Задача 9. Порядки

Пусть  $M_1$  и  $M_2$  — два упорядоченных множества (см. определение ??). Отображение  $f: M_1 \rightarrow M_2$  называется монотонным, если для любых  $x$  и  $y$  из  $M_1$ , таких, что  $x \leq y$ , выполнено, что  $f(x) \leq f(y)$  относительно порядка на  $M_2$ . Монотонное отображение  $f: M_1 \rightarrow M_2$  называется изоморфизмом, если  $f$  биективно и обратное отображение  $f^{-1}: M_2 \rightarrow M_1$  также монотонно.

1. Пусть  $f: M \rightarrow N$  — изоморфизм двух упорядоченных множеств. Покажите, что для любого  $x \in M$  множество  $M_{\leq x} = \{y \in M \mid y \leq x\}$  изоморфно  $N_{\leq f(x)} = \{y \in N \mid y \leq f(x)\}$ .
2. Опишите все изоморфизмы из  $\mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ , где  $\mathcal{P}(X)$  — множество всех подмножеств множества  $X$ , упорядоченных по отношению включения  $\subseteq$ .
3. Пусть  $M_1$  и  $M_2$  — два упорядоченных множества. Тогда введём на  $M_1 \times M_2$  порядок следующим образом:

$$(x_1, y_1) \leq_{\text{nat}} (x_2, y_2) \text{ тогда и только тогда, когда } x_1 \leq x_2 \text{ и } y_1 \leq y_2.$$

Обозначим получившееся упорядоченное множество как  $M_1 \times_{\text{nat}} M_2$ . Будем называть такой порядок естественным. Введём на  $M_1 \times M_2$  другой порядок:

$$\begin{aligned} (x_1, y_1) \leq_{\text{lex}} (x_2, y_2) &\iff \\ &\iff x_1 < x_2 \\ &\text{или } x_1 = x_2 \text{ и } y_1 \leq y_2 \end{aligned}$$

Обозначим это упорядоченное множество как  $M_1 \times_{\text{lex}} M_2$ .

Покажите, что следующие упорядоченные множества не изоморфны между собой:  $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{N} \times_{\text{nat}} \mathbb{N}, \mathbb{N} \times_{\text{lex}} \mathbb{N}, \mathbb{Z} \times_{\text{nat}} \mathbb{Z}, \mathbb{Z} \times_{\text{lex}} \mathbb{Z}, \mathbb{Q}$ .

4. Изоморфны или нет следующие множества:  $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{Q} \times_{\text{lex}} \mathbb{R}, \mathbb{Z} \times_{\text{lex}} \mathbb{R}, \mathbb{Q} \times_{\text{lex}} \mathbb{R}, \mathbb{R} \times_{\text{lex}} \mathbb{R} \times_{\text{lex}} \mathbb{R}$ ?

5. Какие из следующих множеств изоморфны:  $(\mathbb{Z} \times_{lex} \mathbb{Z}) \times_{nat} \mathbb{Z}$ ,  $\mathbb{Z} \times_{lex} (\mathbb{Z} \times_{nat} \mathbb{Z})$ ,  $(\mathbb{Z} \times_{lex} \mathbb{N}) \times_{nat} \mathbb{Z}$ ?
6. Рассмотрите предыдущий вопрос, когда сомножителей больше чем три, “скобки” можно расставлять произвольным образом и на произведениях можно ввести операцию одним из двух описанных выше способов.
7. Опишите все изоморфизмы между найденными парами изоморфных упорядоченных множеств.

## Задача 10. Лучше меньше, да лучше

Пусть  $a_n$  — некоторая последовательность вещественных чисел, такая, что ряд  $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$  сходится. Определим  $S(\{a_n\})$  как множество всех подсумм ряда  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ , а именно:

$$S(\{a_n\}) = \left\{ x \in \mathbb{R} \mid \exists \Gamma \subseteq \mathbb{N}, \text{ что } x = \sum_{k \in \Gamma} a_k \right\}.$$

1. Пусть  $a_n = \frac{1}{2^n}$ . Найдите  $S(\{a_n\})$ .
2. Будем говорить, что множество  $A \subseteq \mathbb{R}$  имеет меру 0, если  $\forall \varepsilon > 0$  существует не более чем счётный набор интервалов  $(x_k, y_k)$ , таких что

$$A \subseteq \bigcup_{k \in \mathbb{N}} (x_k, y_k) \text{ и } \sum_{k \in \mathbb{N}} |y_k - x_k| < \varepsilon.$$

Рассмотрим последовательность  $a_n = \left(\frac{2}{5}\right)^n$ . Покажите, что  $S(\{a_n\})$  имеет меру 0.

3. Покажите, что  $S(\{\frac{1}{n^2}\})$  содержит внутри себя некоторый отрезок ненулевой длины.
4. Мерой замкнутого множества  $A$  на прямой назовём

$$\mu(A) = \inf \left\{ t \in \mathbb{R} \mid \text{существует набор интервалов } (x_k, y_k), \right. \\ \left. \text{что } A \subseteq \bigcup_{k \in \mathbb{N}} (x_k, y_k) \text{ и } \sum_{k \in \mathbb{N}} |y_k - x_k| = t \right\}.$$

Приведите пример последовательности  $a_n$ , что  $S(\{a_n\})$  не содержит отрезка, но является множеством ненулевой меры. Что можно сказать про меру  $S(\{a_n\})$ , где  $a_n$  — геометрическая прогрессия?

5. Рассмотрим множество  $\mathbb{C}$  всех комплексных чисел. Будем говорить, что последовательность комплексных чисел  $x_n$  сходится к некоторому числу  $x$ , если последовательности из вещественных и мнимых частей  $\Re x_n$  и  $\Im x_n$  сходятся к  $\Re x$  и  $\Im x$ , соответственно. Таким образом, возникает возможность по последовательности комплексных чисел  $a_n$  определить

$$S(\{a_n\}) = \{x \in \mathbb{C} \mid \exists \Gamma \subseteq \mathbb{N}, \text{ что } x = \sum_{k \in \Gamma} a_k\},$$

где под суммой ряда подразумевается предел последовательности

$$x_n = \sum_{\substack{k \in \Gamma \\ k \leq n}} a_k.$$

Опишите  $S(\{(\frac{1}{2i})^n\})$ . Найдите последовательность  $a_n$ , что  $S(\{a_n\})$  — круг радиуса 1 на плоскости.

6. Дайте определение меры замкнутого множества на плоскости и приведите пример последовательности  $a_n$ , что  $S(\{a_n\})$  является множеством ненулевой меры и не содержит ни одного круга.
7. Рассмотрите последовательности в  $\mathbb{R}$  и  $\mathbb{C}$ , отличные от геометрической прогрессии. Предложите способ узнать  $\mu(S(\{a_n\}))$ . Насколько произвольным может быть множество вида  $S(\{a_n\})$ ?

## Задачи 2016 года

### Задача 1. Геометрическая вероятность

Пункты этой задачи связаны с расположениями различных случайно взятых геометрических фигур. Что в каждом конкретном случае следует подразумевать под случайной фигурой того или иного вида, находится во власти решающего задачу, хотя, безусловно, требует обоснований. Одно можно сказать наверняка: вероятность — это число от 0 до 1.

1. Пусть на плоскости задана квадратная решётка со стороной 1. Возьмём число  $\varepsilon > 0$  и вокруг точек решётки построим круги радиуса  $\varepsilon$ . Какова вероятность для случайной точки не попасть в объединение этих кругов?

2. На плоскость, расчерченную параллельными прямыми на расстоянии  $h$  друг от друга падает случайный отрезок длины меньшей или равной  $a$ . Какова вероятность того, что этот отрезок пересечёт какую-то прямую? А каково математическое ожидание числа точек пересечения?
3. Та же задача, но теперь вместо отрезка на плоскость попадает крестик — пара отрезков одинаковой фиксированной длины  $a$ , пересекающихся в своих центрах и перпендикулярных друг-другу. А что будет, если угол между отрезками не равен  $\pi/2$ ?
4. Пусть дан некий круг радиуса  $r$ . Какова вероятность того, что конец отрезка длины  $a$  лежит за пределами круга, если это случайный отрезок, чья середина лежит в круге?
5. Пусть плоскость замощена одинаковыми параллелограммами. На плоскость кидают случайный параллелограмм, среди тех
  - а) у которых площадь меньше или равна  $S$ .
  - б) у которых длина сторон меньше  $a$ .
  - в) у которых длины диагоналей меньше  $a$ .Какова вероятность того, что вершина какого-то параллелограмма из замощения лежит в случайном параллелограмме?
6. А если рассмотреть случайный эллипс с такими условиями?
7. Рассмотрим случайный четырёхугольник с длинами сторон  $a, b, c, d$ . Какова вероятность, что он будет содержать точку из решётки? Какова вероятность, что он будет пересекаться с набором параллельных линий, расстояние между которыми равно  $h$ ?
8. А что такое случайный  $n$ -угольник на плоскости с какими-то ограничениями? Какова вероятность для него содержать некоторую точку из решётки или пересекаться с семейством параллельных прямых?

## Задача 2. Гипернатуральные числа

1. Рассмотрим натуральные числа  $n \neq 1$ ,  $m_1$  и  $m_2$ . Покажите, что  $n^{m_1} - 1 \vdots n^{m_2} - 1$  тогда и только тогда, когда  $m_1 \vdots m_2$ .



2. Покажите, что для всех взаимнопростых чисел  $m$  и  $n$  существуют такие натуральные  $k$  и  $l$ , что  $m^l - 1 \vdots n$  и  $n^k - 1 \vdots m$ .
3. Гипернатуральным числом назовём отображение из множества простых чисел  $\mathbb{P}$  в множество  $\mathbb{N} \cup \{0, \infty\}$ . Естественным образом каждому натуральному числу можно сопоставить такое отображение, а именно, если  $n = p_1^{\alpha_1} \dots p_n^{\alpha_n}$ , где  $p_i$  - различные простые, то соответствующее отображение задано формулой

$$n(q) = \begin{cases} \alpha_i, & q = p_i \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Также можно определить произведение, наименьшее общее кратное и наибольший общий делитель по следующим формулам:

$$x_1 \cdot x_2(q) = x_1(q) + x_2(q),$$

$$\text{НОК}(x_1, x_2)(q) = \max(x_1(q), x_2(q)),$$

$$\text{НОД}(x_1, x_2)(q) = \min(x_1(q), x_2(q)).$$

Будем говорить, что  $x \vdots y$ , если  $\forall q \in \mathbb{P} \ x(q) \geq y(q)$ . Рассмотрим некоторое множество  $A$  гипернатуральных чисел. Определим наименьшее общее кратное всех элементов из  $A$  по формуле  $\text{НОК}(A)(q) = \sup_{x \in A} \{x(q)\}$ . Теперь для гипернатурального числа  $x$  и натурального  $n$  определим

$$n^x - 1 = \text{НОК} \left( \{n^m - 1 \mid m \in \mathbb{N}, x \vdots m\} \right).$$

Решите следующие задачи:

- а) Вычислите  $3^x - 1$ ,  $5^x - 1$  и, в целом,  $p^x - 1$ , где  $p$ -простое, а  $x = (\infty, \infty, \dots)$ .
- б) Верно ли, что  $n^x - 1 = n^y - 1$  тогда и только тогда, когда  $x = y$ , где  $x$  и  $y$  гипернатуральные,  $n \in \mathbb{N}$ .
- в) Покажите, что уравнение  $3^x - 1 = 5^y - 1$  неразрешимо в гипернатуральных числах. Аналогично покажите, что уравнение  $3^x - 1 = 11^y - 1$  не имеет гипернатуральных решений.

4. Пусть  $l^\infty = \text{НОК}(\{l^n \mid n \in \mathbb{N}\})$ . Попробуйте найти  $p^{l^\infty} - 1$  для некото-

рых простых  $p$  и  $l$ .

5. Попробуйте разобрать случай уравнения  $p^x - 1 = l^y - 1$  для бесконечных серий простых чисел или дайте ответ для произвольных простых.
6. Бывают ли решения у уравнения  $n^x - 1 = m^y - 1$ , когда  $n$  и  $m$  взаимнопростые натуральные числа? А когда не взаимнопростые?
7. Попробуйте решить другие уравнения в гипернатуральных числах, например,  $n^x - a = n^y - b$ .

### Задача 3. Шоколадки

Мальчик Коля пришёл в магазин выбирать шоколадку в поход. Так как вкусам своих товарищей он не видел возможности угодить, то Коля решил из всех шоколадок выбрать ту, которую проще всего поделить поровну. А именно, пусть шоколадка представляет собой прямоугольник  $a \times b$ ,  $a, b \in \mathbb{N}$ , состоящий из  $a \cdot b$  долек. Колю интересуют те формы шоколадок, где число долек делится поровну между участниками похода. Но вот беда, Коля точно не знает, сколько людей идёт в поход.

1. Считая, что в походе с одинаковой вероятностью могут оказаться от 2 до 10 человек, найдите все такие формы шоколадок из не более чем 100 долек, количество долек в которых с наибольшей вероятностью будет делиться на количество участников похода. Сколько различных конфигураций подойдёт? А если не более 50-ти долек?
2. При заданных ограничениях на размер шоколадки и на количество участников похода, те шоколадки, которые с наибольшей вероятностью делятся поровну, будем называть оптимальными. Решение с наименьшим числом долек будем называть минимальной оптимальной шоколадкой.
  - а) Покажите, что при фиксированном максимальном числе участников похода и росте ограничения на число шоколадок размер минимальной оптимальной шоколадки стабилизируется. Как описать размер (количество долек) минимальной шоколадки в зависимости от ограничения на число человек? Оцените, с какого места ограничение на размер не имеет значения.
  - б) Покажите, что при фиксированной верхней оценке на размер шоколадки и росте возможного числа людей, количество долек

в минимальной шоколадке стабилизируется. Опишите и оцените размер минимальной шоколадки после стабилизации.

- в)** Сколько различных конфигураций для минимальных шоколадок из пунктов а) и б)?
- 3.** Опишите алгоритм построения оптимальной шоколадки при заданных ограничениях. Какова сложность Вашего алгоритма?
- 4.** Допустим теперь, что в магазине бывают не все шоколадки, а только вида  $a \times b$ , где  $b \geq a \geq \varepsilon b$ , для некоторого фиксированного  $\varepsilon \leq 1$ . Изменится ли количество долек в минимальной оптимальной шоколадке с таким условием? Оцените количество оптимальных шоколадок, удовлетворяющих этому условию.
- 5.** Рассмотрим ситуацию, когда каждый из  $d$  людей, которым Коля предложил идти в поход, пойдут в него —  $i$ -ый с вероятностью  $p_i \leq 1$ . Будучи несколько ленивым, Коля хочет найти не самое оптимальное, а  $\varepsilon$ -оптимальное решение, то есть такую шоколадку, которая делится нацело между участниками с вероятностью в  $\varepsilon \leq 1$  раз меньше, чем для оптимальной шоколадки. Предложите свои варианты решения этой задачи, если:
- а)** Для всякого  $1 \leq i \leq d$   $p_i = p < 1$ .
- б)**  $\varepsilon$  достаточно маленькое ( $\varepsilon = \frac{1}{100}$ ).

## Задача 4. Матрицы и периоды

- 1.** Рассмотрим целочисленную матрицу  $2 \times 2$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Возьмём некоторый целочисленный вектор  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ , натуральное число  $n$  и построим последовательность

$$x_k = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^k \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod n.$$

Здесь и далее под записью  $\pmod n$  подразумевается взятие остатка от деления на  $n$ . Покажите, что эта последовательность будет чисто периодической, то есть существует такое  $m \in \mathbb{N}$  со свойством

$x_{k+m} = x_k$  для любого  $k \in \mathbb{N}$ . Каков период этой последовательности в зависимости от  $x, y$  и  $n$ ?

2. Рассмотрим целочисленную матрицу, некоторый начальный вектор и натуральное число  $n$ . Рассмотрим последовательность, аналогичную предыдущему пункту

$$x_k = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^k \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod n.$$

- а) Покажите, что эта последовательность не обязательно чисто периодическая.
- б) Тем не менее, период у этой последовательности есть, то есть найдётся такое  $m$ , что для всех достаточно больших  $k > N$   $x_{k+m} = x_k$ .
- в) Оцените период этой последовательности в зависимости от  $n$ . Достигается ли Ваша оценка для какой-либо матрицы?
- г) Как описать те матрицы, последовательности для которых всегда будут чисто периодичны для любых  $x, y$  и  $n$ ?

3. Рассмотрим матрицы

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$$

- а) Чему равны периоды последовательностей для начального вектора  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ , если число  $n$  — некоторое простое число?
  - б) Покажите, что если  $n|l$ , то тогда  $\pi(n)|\pi(l)$ , где  $|$  означает то, что первое число делит второе, а  $\pi(n)$ , сокращение для  $\pi(A, x, n)$ , период последовательности, построенной по матрице  $A$ , начальному вектору  $x$  и некоторому  $n$ .
  - в) Попробуйте связать периоды по модулю  $n, m$  и  $nm$ .
4. Как изменится период, если для указанных выше матриц в качестве начального вектора взять не вектор  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ , а другой?
5. Рассмотрите аналогичную задачу для матриц произвольного размера.

## Задача 5. Отмеченные точки

На плоскости отметим несколько точек  $P_1, \dots, P_n$ . Будем пошагового добавлять новые точки по следующему правилу: если точки  $P$  и  $P'$ ,  $Q$  и  $Q'$  уже отмечены, а отрезки  $PP'$  и  $QQ'$  пересекаются по единственной точке  $N$ , то эта точка будет отмечена на следующем шаге, если не была отмечена ранее.

1. а) Покажите, что если изначально точек было не более 4, то после первого шага нельзя будет отметить ни одной новой точки.  
б) Найдите все такие конфигурации изначальных точек, что после некоторого числа шагов точек добавить уже нельзя.
2. Покажите, что есть такая комбинация из более чем пяти точек, к которой после любого шага всё равно можно добавить точки.
3. Рассмотрим множество  $M_i = M_{i, P_1, \dots, P_n}$  — множество всех точек, которые были отмечены на шаге  $i$ , если мы стартовали с  $P_1, \dots, P_n$ . Определим  $M_\infty = \bigcup_{i=0}^{\infty} M_i$  — множество всех точек добавленных на каком-либо шаге.
4. Дайте описание для  $cl(M_\infty)$  — замыкания множества  $M_\infty$ , где под замыканием множества  $A$  подразумевается множество всех точек  $x$  плоскости, что для всякого  $\varepsilon > 0$  существует точка  $y \in A$  такая, что  $\text{dist}(x, y) < \varepsilon$ , где  $\text{dist}(x, y)$  обозначает обычное расстояние. Покажите, что получившаяся фигура обязательно является выпуклым многоугольником в объединении с конечным числом точек.
5. Рассмотрим выпуклый многоугольник  $P$  с вершинами  $P_1, \dots, P_n$ . Построим по этим вершинам множество  $Q = cl(M_\infty)$ . Каким может быть отношение площади  $Q$  к площади  $P$ ?
6. Каково отношение площадей в случае правильного  $n$ -угольника для  $n \geq 5$ ?
7. Рассмотрим выпуклый прямоугольник  $ABCD$ . Рассмотрим некоторую точку  $E$  внутри. При каком выборе  $E$  достигается максимум площади  $cl(M_{\infty, A, B, C, D, E})$ ? Для параллелограмма? Для произвольного выпуклого четырёхугольника? Каково будет отношение площади получившегося множества к площади изначальной фигуры?
8. Исследуйте другие вопросы, связанные с площадями для многоугольников с большим числом сторон. Рассмотрите ситуацию в трёх измерениях — как нужно модифицировать определение?

9. Что будет, если исходных точек суть бесконечно много? Например, если исходное множество точек — это объединение нескольких кривых?

## Задача 6. Раздутия и стягивания

1. Рассмотрение этой задачи мы начнём с описания некоторого множества преобразований отрезка  $[0, 1]$  в себя. Число вида  $\frac{k}{2^n}$ , где  $k, n \in \mathbb{Z}$  будем называть двоично-рациональным. Разбиением отрезка называется набор конечного числа точек в нём, а отрезки, соединяющие соседние точки между собой или крайние с концами отрезка — элементами разбиения. Будем называть отрезок  $[a, b]$  диадическим, если  $a = \frac{k}{2^n}$ , а  $b = \frac{k+1}{2^n}$ , где  $k, n \in \mathbb{N}$ . Непрерывное отображение  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  называется кусочно-линейным, если существует разбиение отрезка  $[a, b]$ , так что  $f(x) = qx + r$  для некоторых  $q, r \in \mathbb{R}$  на каждом элементе разбиения. Кусочно-линейную непрерывную биекцию  $f$  из отрезка  $[a, b]$  в отрезок  $[c, d]$  такую, что найдётся разбиение  $[a, b]$ , что его элементы  $I_k$  — диадические отрезки, а  $f|_{I_k}(x) = 2^n x + r$  для некоторых  $n \in \mathbb{Z}, r \in \mathbb{R}$ , будем называть  $pl_2$ -преобразованием отрезка  $[a, b]$  в отрезок  $[c, d]$ . Рассмотрим множество  $F$ , состоящее из всех  $pl_2$ -преобразований отрезка  $[0, 1]$  в себя. Например, такая функция лежит в  $F$ :

$$f(x) = \begin{cases} 2x, & 0 \leq x < \frac{1}{4} \\ x + \frac{1}{4}, & \frac{1}{4} \leq x < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}, & \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \end{cases}.$$

- а) Покажите, что если  $f \in F$ , то  $f(0) = 0$ ,  $f(1) = 1$ .
- б) Покажите, что отображение из  $F$  переводит некоторое разбиение отрезка  $[0, 1]$  на диадические отрезки в новое разбиение  $[0, 1]$  на диадические.
- в) Покажите, что если  $f, g \in F$ , то  $f \circ g \in F$ .
- г) Покажите, что если  $f \in F$ , то  $f^{-1} \in F$ .
- д) Покажите, что если  $f \in F$ ,  $f \neq \text{Id}_{[0,1]}$ , тогда  $f^{(n)} \neq \text{Id}_{[0,1]}$ . Иными словами,  $F$  образует группу относительно композиции, в которой нет элементов конечного порядка.

- е) Покажите, что для любых двух разбиений отрезка  $[0, 1]$  на одинаковое число диадических интервалов существует единственная  $f \in F$ , переводящая каждый элемент первого разбиения линейно в элемент второго.
- ё) Покажите, что у любого такого преобразования  $f \in F$  число неподвижных точек, не лежащих ни на каком неподвижном отрезке, конечно. Чем можно ограничить число этих неподвижных точек? А у  $f^{(n)}$ ? Здесь  $f^{(n)}$  обозначает композицию  $f$  с собой  $n$  раз.
- ж) А сколько может быть различных неподвижных точек у преобразования, которое построено с помощью операции композиции из двух функций  $f, g$  в зависимости от числа их неподвижных точек?
- з) Обобщите все указанные свойства на  $pl_2$ -преобразования между произвольными отрезками.
2. Циклическим  $pl_2$ -преобразованием  $f: [a, b] \rightarrow [c, d]$  отрезков с двоично-рациональными концами называется отображение  $f: [a, b] \rightarrow [c, d]$ , разрывное не более чем в одной точке  $x_1$ , такое что  $f(a) = f(b), f(x_1) = d$ , функция  $f|_{[a, x_1]}$  —  $pl_2$ -преобразование на образ, а  $g = f|_{(x_1, b]}$  — определяется до  $pl_2$ -преобразования на образ тем что  $g(x_1) = c$ . В частности, если точки разрыва нет, то это просто  $pl_2$ -преобразование.
- а) Покажите, что такое отображение задаёт непрерывную биекцию из окружности длины  $b - a$  в окружность длины  $d - c$ .
- б) Определите композицию циклических  $pl_2$ -преобразований, так, чтобы оно было согласовано с композицией обычных  $pl_2$ -преобразований.
- в) Покажите, что множество  $T$  всех циклических  $pl_2$ -преобразований  $[0, 1]$  в себя образует группу.
- г) Опишите элементы конечного порядка в этой группе.
3. Покажите, что для любого отрезка  $[a, b]$ ,  $a = k/2^n$ ,  $b = l/2^m$  существует  $pl_2$ -преобразование  $f: [a, b] \rightarrow [0, 1]$ ,  $k, l, n, m \in \mathbb{Z}$ .
4. Весом на отрезке  $[0, n]$ ,  $n \in \mathbb{N}$  назовём функцию  $W: V \rightarrow \mathbb{Z}$ , где  $V = \{0, 1, \dots, n\}$ . Пусть даны отрезки  $[0, n]$ ,  $[0, n + 1]$  и веса  $W, W_1$  на них. Будем говорить, что эти два отрезка с весом связаны преобразованием раздутия в отрезке  $[i, i + 1]$ ,  $i < n, i \in \mathbb{N}$ , если для

$pl_2$ -преобразования  $f: [0, n] \rightarrow [0, n + 1]$ , заданного по формуле

$$f(x) = \begin{cases} x, & x \in [0, i] \\ 2x - i, & x \in [i, i + 1] \\ x + 1, & x \in [i + 1, n] \end{cases}$$

и переводящего целые точки в целые, верно

$$W_1(k) = \begin{cases} W(f^{-1}(k)), & k \neq i, i + 1, i + 2 \\ W(f^{-1}(k)) - 1, & k \in \{i, i + 2\} \\ -1, & k = i + 1 \end{cases}.$$

Обратное преобразование  $f^{-1}$  назовём стягиванием точки  $x = i + 1$  на взвешенном отрезке  $[0, n + 1]$ . Вес  $W$  на отрезке  $[0, n]$  называется циклическим, если  $W(0) = W(n)$ . Если  $i \neq 0, n - 1$ , то циклическое раздутие отрезка  $[0, n]$  с циклическим весом  $W$  в отрезке  $[i, i + 1]$  - это просто раздутие в соответствующем отрезке (проверьте, что новый вес в этом случае тоже циклический). В случае  $i = 0$ , надо лишь уменьшить  $W_1(n + 1) = W(n) - 1 = W(0) - 1 = W_1(0)$ , так, чтобы новый вес стал циклическим. В случае  $i = n - 1$  определим циклическое  $pl_2$ -преобразование

$$f(x) = \begin{cases} x + 1, & x \in [0, n - 1] \\ 2x - n + 2, & x \in [n - 1, n - \frac{1}{2}] \\ 2x - 2n + 1, & x \in (n - \frac{1}{2}, n] \end{cases}.$$

Веса вводятся так же, через формулы для прообразов и соотношение  $W_1(n + 1) = W_1(0) = -1$ . Стягивание — обратное преобразование.

Теперь, если есть набор отрезков с весами  $\Gamma_0, \dots, \Gamma_n$  и преобразований  $f_i: \Gamma_{i-1} \rightarrow \Gamma_i$ , каждое из которых либо раздутие, либо стягивание, то композиция  $f_n \circ \dots \circ f_1$  называется преобразованием  $\Gamma_0 \rightarrow \Gamma_n$ . Аналогично определим циклическое преобразование отрезков с циклическими весами. Отрезок с циклическим весом будем рисовать как замкнутую ломанную, где около вершин подписаны веса. Отрезок с весом, который нельзя стянуть, называется минималь-



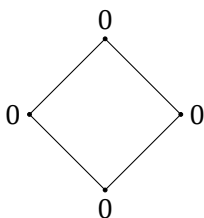
ным.

- а) Какие  $pl_2$ -преобразования  $f$  получаются допустимыми для отрезка  $[0,1]$  и всех возможных весов на нём?
- б) Покажите, что любой отрезок с весом преобразуется в минимальный. Аналогично для циклических весов и циклических преобразований. Единственным ли образом определён соответствующий минимальный отрезок с весом? Попробуйте найти какой-нибудь канонический минимальный отрезок с весом, в который преобразуется данный. Какая у него длина?
- в) Покажите, что у взвешенного разбиения отрезка  $[0,1]$  с точками разбиения на концах

$$a \bullet \longrightarrow \bullet b$$

где  $a, b \in \mathbb{Z}$  веса, нет нетривиальных преобразований в себя.

- г) Покажите, что у любого взвешенного отрезка нет нетривиальных преобразований в себя. Но могут быть такие, которые меняют веса на концах.
- д) Опишите группу циклических преобразований.



- е) Попробуйте описать группу циклических преобразований любого отрезка с нулевыми весами.
5. Считая, что мы определили допустимые преобразования цепей и циклов как графов, дайте определения допустимых преобразований произвольных графов.

## Задача 7. Учимся считать

$F$  - произвольное поле,  $\binom{n}{k}$  — число сочетаний из  $n$  элементов по  $k$ .

1. Посчитайте, чему равно

$$-\binom{b+1}{0}\binom{b+c}{b-1}\binom{c+1}{c-1} + \binom{b+1}{1}\binom{b+c}{b}\binom{c+1}{c} - \\ - \binom{b+1}{2}\binom{b+c}{b+1}\binom{c+1}{c+1}.$$

Ответ будет заметно короче этого выражения!

2. Представьте следующие числа в виде произведения и частного некоторых факториалов:

$$\binom{4}{0}^3 - \binom{4}{1}^3 + \binom{4}{2}^3 - \binom{4}{3}^3 + \binom{4}{4}^3$$

и

$$\binom{6}{0}^3 - \binom{6}{1}^3 + \binom{6}{2}^3 - \binom{6}{3}^3 + \binom{6}{4}^3 - \binom{6}{5}^3 + \binom{6}{6}^3.$$

3. Попробуйте как-то обобщить без строгого доказательства полученные результаты.

4. Посчитайте, чему равен коэффициент многочлена  $[x^2y^2z^2](x-y)^2(y-z)^2(z-x)^2$ , где  $[]$  означает взятие коэффициента при соответствующем мономе. А  $[x^2y^2z^2](x-y)(x-y-1)(y-z)(y-z-1)(z-x)(z-x-1)$ ? В каких целочисленных точках куба  $(0 \leq x \leq 3) \times (0 \leq y \leq 3) \times (0 \leq z \leq 3)$  эти многочлены принимают ненулевые значения? Что можно сказать про значения этих многочленов в целых точках данного куба и про указанный коэффициент?

5. Докажите интерполяционную формулу Лагранжа: если  $C$  - произвольное подмножество  $F$  размера  $d+1$ , а  $f$  - многочлен степени не выше  $d$ , то

$$f = \sum_{a \in C} f(a) \prod_{c \in C, c \neq a} \frac{x-c}{a-c}.$$

6. Пусть  $f \in F[x_1, x_2]$  - многочлен от двух переменных суммарной степени  $\deg(f) \leq d_1 + d_2$ , а  $C_1, C_2$  - произвольные подмножества  $F$  размера  $|C_i| \geq d_i + 1$ . Тогда

$$\sum_{c_1 \in C_1} \sum_{c_2 \in C_2} \frac{f(c_1, c_2)}{\phi'_1(c_1)\phi'_2(c_2)} = [x_1^{d_1} x_2^{d_2}] f(x_1, x_2),$$

где  $\phi_i(z) = \prod_{c \in C_i} (z - c)$ .

7. Постарайтесь усилить и доказать теорему из пункта 6. Можете ли Вы придумать способ выразить коэффициент многочлена при произвольном мономе через его значение в заданных точках (как в предыдущем пункте, например)?
8. Постарайтесь посчитать, чему равен коэффициент многочлена  $[x^a y^a z^a](x - y)^a (y - z)^a (z - x)^a$  двумя разными способами и получить отсюда загладочное тождество.
9. Постарайтесь придумать тождество, обобщающее все тождества этой задачи, и доказать его.

## Задача 8. Разрезания куба

1. Рассмотрим куб  $3 \times 3 \times 3$ . Мы хотим разрезать его на кубики  $1 \times 1 \times 1$ . За один раз можно сделать разрез в одной плоскости, при этом перед следующим разрезом можно переставлять в пространстве уже отрезанные части. За какое минимальное число разрезов можно справиться?
2. Рассмотрите теперь куб  $n \times n \times n$ . За сколько разрезов можно справиться? Объясните, почему за меньшее число нельзя?
3. А сколькими разными способами можно произвести такое разрезание (способы различны, если на каком-то шаге от кубика отрезаны разные множества)? А если называть разрезания разными, когда на каком-то шаге в них отличаются наборы отрезанных фигур?
4. Рассмотрим равносторонний треугольник на плоскости с длиной стороны  $n$ . Мы хотим разрезать его на равносторонние треугольники с длиной стороны 1. За сколько разрезов это возможно? Сколькими способами?
5. Рассмотрите аналогичную задачу для  $d$ -мерного куба и  $d$ -мерного симплекса.
6. Проверьте, что трёхмерный куб  $n \times n \times n$  можно разрезать на  $4n^3$  прямоугольных тетраэдров и  $n^3$  правильных тетраэдров. Каково наименьшее число разрезов?
7. Рассмотрите другие возможные разрезания.

## Задача 9. Маляры

Графом  $G = (V, E)$  называется множество  $V$  и симметричное отношение инцидентности  $E \subset V \times V$ . Множество  $V$  называется множеством вершин, а  $E$  — множеством ребер. Если  $E \cap \{(v, v) | v \in V\} = \emptyset$ , то говорят, что в графе нет петель. Мы будем рассматривать только такие графы.

Правильной раскраской графа  $G$  в  $n$  цветов называется отображение  $col : V \rightarrow [n] = \{1, 2, \dots, n\}$  такое, что никаким двум инцидентным вершинам не сопоставляется один и тот же цвет, то есть  $(v, v') \in E \Rightarrow col(v) \neq col(v')$ . Хроматическим числом графа  $G$  называется наименьшее  $n$ , для которого существует правильная раскраска в  $n$  цветов. Хроматическое число обозначается  $\chi(G)$ .

Пусть  $(M, d)$  — метрическое пространство. Положим,  $V = M$  и  $E = \{(m, m') \in M \times M \mid d(m, m') = 1\}$ . Тогда по определению  $\chi(M) = \chi(G)$ , где  $G = (V, E)$ .

Во всех последующих пунктах через  $\mathbb{R}$  обозначается множество вещественных чисел, через  $\mathbb{R}^n$  обозначается метрическое пространство, точки которого являются упорядоченными наборами из  $n$  чисел, а расстояние определяется по формуле

$$d((x_1, \dots, x_n), (y_1, \dots, y_n)) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - y_j)^2}.$$

Все подмножества  $\mathbb{R}^n$  считаются метрическими пространствами с индуцированной из  $\mathbb{R}^n$  метрикой.

1. Докажите, что  $\chi(\mathbb{R}^2) \geq 4$ , то есть плоскость нельзя раскрасить в 3 цвета. Предъявите раскраску плоскости в 7 цветов:  $\chi(\mathbb{R}^2) \leq 7$ .
2. Докажите, что  $\chi(\mathbb{R}^n) \geq n + 2$ .
3. Зафиксируем положительное число  $\varepsilon < \sqrt{3/7}$ . Покажите, что  $5 \leq \chi(\mathbb{R}^2 \times [0, \varepsilon]) \leq 7$ .
4. Зафиксируем положительное число  $\varepsilon < 10^{-3}$ . Покажите, что  $\chi(\mathbb{R}^2 \times [0, \varepsilon]^2) \geq 6$ .
5. Зафиксируем простое число  $p$ . Через  $\mathbb{F}_p$  будем обозначать поле из  $p$  элементов. Пусть  $n$  — натуральное число, рассмотрим граф  $G_n^p = (V_n^{(p)}, E_n^{(p)})$ , где  $V_n^{(p)} = (\mathbb{F}_p)^n$ , а  $E_n^{(p)} = \{(v, w) \in V_n^{(p)} \times V_n^{(p)} \mid v \cdot w = 1\}$ , где

$$(v_1, \dots, v_n) \cdot (w_1, \dots, w_n) = \sum_{j=1}^n v_j w_j.$$

Оцените  $\chi(G_n^2)$ ,  $\chi(G_n^3)$  при больших  $n$ .

6. Оцените  $\chi(G_n^p)$  при больших  $n$  для произвольного  $p$ .

## Задача 10. Как подгонять и не оплошать

В некотором конкурсе участвуют  $n$  команд из  $k$  участников. Команды уже отыграли, и осталось лишь определить победителя. При равенстве очков одно место может распределиться среди нескольких команд (как на математической олимпиаде).

Каждый участник команды заработал некоторую оценку из интервала  $[0, 1]$ . Таким образом, результаты команд, исходя из которых надо их упорядочить, записаны невозрастающими последовательностями из  $k$  неотрицательных чисел. И для того, чтобы подвести итог, необходимо придумать функцию  $f: [0, 1]^k \rightarrow \mathbb{R}$ , которая будет вычислять окончательный результат каждой команды.

А теперь — главный нюанс. Выбор этой функции целиком во власти жюри. Предположим, что некий член жюри, ответственный за выбор функции, пытается предложить капитанам команд подобрать  $f$  таким образом, чтобы команда этого капитана не оказалась, ммм..., в последних рядах.

Но не всё так просто. С одной стороны понятно, что стоит пообещать первое место наибольшему числу команд, однако, если ответственный обнадёжит тем, что потом не сможет сделать, то обиженная команда обязательно разболтает о его предложении.

Вдобавок, Комитетом По защите Прав Олимпиадников установлены следующие правила: функция  $f$  должна иметь вид

$$f(x_1, \dots, x_k) = \left( \sum_{j=1}^k w_j x_j^l \right)^{1/l}$$

для некоторого вещественного числа  $l \geq 1$  и весов  $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_k > 0$ .

1. Пусть  $k = 3$ ,  $n = 4$  и результаты оказались следующими:

$$(0.3, 0.1, 0.1), (0.2, 0.2, 0.1), (0.15, 0.14, 0.14), (0.13, 0.1, 0.1).$$

Стоит ли обещать помощь последней команде?

2. Будем говорить, что  $(x_1, \dots, x_k)$  мажорирует  $(y_1, \dots, y_k)$ , если  $\sum_{i=1}^j x_i >$

$\sum_{i=1}^j y_i$  для любого  $j$ . Предположим, что ни для каких двух команд не верно, что результаты одной мажорируют результаты другой.

Какое максимальное число команд гарантировано можно вывести на первое место?

3. Пусть  $A \subset [0, 1]^k$  — некоторое открытое подмножество. Вероятностью того, что результаты данной команды попали в множество  $A$ , будем считать  $|A|$ , где  $|A|$  — объем множества  $A$ . Результаты команд считаются независимыми в совокупности.

Пусть  $k, n$  и некоторое натуральное число  $j$  фиксированы. С какой вероятностью можно подобрать  $l, w_1, \dots, w_k$  для того, чтобы вывести на первое место ровно  $j$  команд?

## Задача 11. Как бы поделить

- Многочлен  $f(x) \in F[x]$  с коэффициентами из поля  $F$  называется неприводимым, если все его делители в  $F[x]$  имеют вид  $c, cf(x)$ ,  $c \in F \setminus \{0\}$ . Покажите, что следующие многочлены неприводимы, как многочлены с рациональными коэффициентами:
  - $x^2 + 2bx + 1$ , где  $b \in \mathbb{Z}$ ,  $|b| > 1$ .
  - $x^4 + 1$ .
- Разложите на неприводимые множители  $x^{18} - 1$  над рациональными числами. Найдите нетривиальное разложение на множители числа  $2^{18} - 1$ .
- Хорошо известно, что многочлен  $\Phi_n(x) = \prod_{(k,n)=1, k < n} (x - e^{2\pi i k/n})$  является многочленом с целыми коэффициентами и что  $x^n - 1 = \prod_{d|n} \Phi_d(x)$ . Покажите, что многочлен  $\Phi_n(x)$  неприводим над  $\mathbb{Q}$ .
- Для каких  $n$  многочлен  $\Phi_n$ , взятый по модулю простого  $p$  (что корректно, так как он с целыми коэффициентами), приводим в поле из  $p$  элементов? Например, при  $p = 11$ ?
- Покажите, что над полем из  $p$  элементов многочлен  $x^p - x + 1$  неприводим. Покажите, что он является делителем  $x^{p^p-1} - 1$ . Делителем какого  $\Phi_d(x)$  является  $x^p - x + 1$ ?

6. Рассмотрим некоторый целочисленный многочлен  $g(y) \in \mathbb{Z}[y]$ . Например,  $g(y) = ay^n$ . Для каких  $g(y)$  и  $d$  многочлен  $\Phi_d(g(y))$  не является неприводимым над  $\mathbb{Q}$ ?
7. Что можно сказать, если вместо  $\Phi_d(x)$  взять какой-то другой неприводимый многочлен? Можно ли взять  $g(y)$  маленькой степени (меньше степени исходного многочлена)? Бесконечно ли число таких  $g(y)$ ?

## Задача 12. Выпуклые функции

Напомним, что функция  $F: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  называется выпуклой, если

$$\forall x, y \in \mathbb{R}^d, t \in [0, 1] \quad tF(x) + (1-t)F(y) \geq F(tx + (1-t)y).$$

1. Хорошо известно, что выпуклая функция из  $\mathbb{R}$  в  $\mathbb{R}$  непрерывна. Покажите, что это выполнено и в случае большей размерности.
2. Теперь рассмотрим ситуацию похитрее. Пусть  $d = 2$  и  $f(x_1, x_2)$  выпукла по каждой координате в отдельности, то есть при фиксированном  $x_1$  она выпукла, как функция от  $x_2$  и наоборот. Покажите, что  $f$  непрерывна.
3. Покажите то же самое для  $d > 2$ .
4. Пусть  $F$  выпукла и положительно однородна порядка 1, т.е.  $F(\lambda x) = |\lambda|F(x) \quad \forall x \in \mathbb{R}^d$ . Покажите, что такая функция неотрицательна.
5. Пусть функция  $F: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  является выпуклой по каждой переменной и положительно однородна порядка 1. Докажите, что функция  $F$  неотрицательна.
6. Функция  $F$  называется липшицевой, если существует такая  $L > 0$ , что

$$|f(x) - f(y)| < L|x - y| \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^d.$$

Функция  $F: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  называется субгармоничной, если для всякой точки  $x_0$  и шарика  $Q$  с центром в точке  $x_0$   $F(x_0) \leq \frac{1}{\text{Vol}(Q)} \int_Q F(x) dx$ , где

$\text{Vol}(Q)$  обозначает объём шара  $Q$ .

Пусть функция  $F: \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \mathbb{R}$  липшицева, положительно однородна порядка 1, и для каждого  $j \in [1, d]$  субгармонична по переменным  $(x_j, x_{j+d})$ . Докажите, что функция  $F$  неотрицательна, если:

- а)  $d$  равно единице.

б)  $d$  — произвольное натуральное число.

7. Постройте контрпример для случая нечётной размерности. Например, в  $\mathbb{R}^3$ .

## Задачи 2015 года

### Задача 1. Определители

Напомним, что на множестве квадратных матриц размера  $n$  есть функция  $\Delta$ , сопоставляющая матрице некоторое число, которое называется определителем этой матрицы. Эта функция однозначно задаётся следующими условиями: если матрица  $A$  представлена в виде  $(u_1, \dots, u_n)$ , где  $u_i$  столбцы чисел, то тогда

1. Если случилось так, что столбец  $u_i = v + \lambda v'$ , где  $v$  и  $v'$  столбцы, а  $\lambda$  — некоторое число, то

$$\Delta(A) = \Delta(u_1, \dots, u_{i-1}, v, u_{i+1}, \dots, u_n) + \lambda \Delta(u_1, \dots, u_{i-1}, v', u_{i+1}, \dots, u_n).$$

2. Для любых  $1 \leq i < j \leq n$  выполнено

$$\Delta(A) = -\Delta(u_1, \dots, u_{i-1}, u_j, u_{i+1}, \dots, u_{j-1}, u_i, u_{j+1}, \dots, u_n).$$

3.  $\Delta(E) = 1$ , где  $E$  матрица, такая что  $E_{ij} = 0$ , для  $i \neq j$  и  $E_{ii} = 1$ .

Так, например, определитель для матрицы  $A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}$  размера 2 может быть вычислен по формуле

$$\Delta(A) = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}.$$

Матрица  $A$  называется симметричной, если  $A_{ij} = A_{ji}$  для всех возможных  $i$  и  $j$ .

Главным минором порядка  $k$ , или просто  $k$ -ым главным минором матрицы  $A$ , называется число, равное определителю матрицы  $C$  размера  $k$ , где  $C_{i,j} = A_{i,j}$  ( $1 \leq i, j \leq k$ ). Будем обозначать это число  $\Delta_k(A)$ . Последовательностью главных миноров матрицы  $A$  называется строка  $(\Delta_1(A), \dots, \Delta_n(A))$ .

1. Покажите, что если  $A$  симметричная матрица размера 2, составленная из вещественных чисел и её первый главный минор равен 0, то её определитель отрицателен.



2. Докажите, что для комплексных симметричных матриц  $2 \times 2$  в качестве последовательности главных миноров реализуется любая строка комплексных чисел.
3. Исследуйте эти же вопросы для матриц  $3 \times 3$ .
4. Для любого натурального  $n$  найдите все упорядоченные наборы  $(B_1, \dots, B_n)$   $F^n$ , для каждого из которых найдется симметричная матрица  $A$  размера  $n$  с элементами из  $F$ , у которой последовательность главных миноров совпадает с  $(B_1, \dots, B_n)$ , а  $F$  – одно из следующих множеств
  - а)  $\mathbb{R}$ ,
  - б)  $\mathbb{C}$ ,
  - в)  $\mathbb{Q}$ ,
  - г) любое другое поле.
5. Исследуйте вопрос пункта 4 для целочисленных матриц, матриц с коэффициентами в целых гауссовых числах и т.д.
6. Предложите свои обобщения этой задачи и решите их.

## Задача 2. Короткие дороги

В некоторой стране идёт активное строительство дорог. Основная задача состоит в том, чтобы соединить между собой все города наименьшей по общей длине системой дорог. В данном случае будем считать, что города – это точки на плоскости, а система дорог – это набор отрезков, не пересекающихся между собой нигде, за исключением, возможно, своих концов. Назовём точку — точкой разветвления дорог, если в этой точке встречаются три или более дороги. Стоит отметить, что концом отрезка не обязательно является город.

1. Определите, как выглядит оптимальная система дорог, если в стране всего три города, находящихся на равном расстоянии; на разных расстояниях друг от друга. Найдите длину этой сети дорог.
2. Покажите, что для любой конфигурации городов оптимальная сеть дорог образует дерево с вершинами в городах и точках разветвления дорог.
3. Выясните, какие возможны конфигурации дорог в точках разветвления.

4. Оцените число рёбер в этом графе.
5. Найдите оптимальную конфигурацию для страны, чьи города расположены в вершинах прямоугольника; в вершинах других многоугольников.
6. Оцените длину оптимальной системы дорог для произвольной конфигурации; для городов, находящихся в вершинах выпуклого многоугольника. Оптимальна ли Ваша оценка?
7. Верно ли, что Ваши необходимые условия реализации графа в качестве оптимальной системы дорог являются достаточными.
8. Обобщите и решите задачу, когда точки лежат на сфере, а дороги проходят по дугам больших окружностей. Рассмотрите случай других метрических пространств.

### Задача 3. Различные расстояния

Рассмотрим  $M$  некоторое множество точек в  $k$ -мерном пространстве. Пусть  $D(M) = |\{r = \text{dist}(x_i, x_j) \mid x_i, x_j \in M; x_i \neq x_j\}|$  - количество различных расстояний между точками множества  $M$ . Определим теперь

$$D_k(n) = \min_{\substack{|M|=n \\ M \subset \mathbb{R}^k}} D(M).$$

К примеру,  $D_2(3) = 1$ .

1. Найдите  $D_2(4), D_2(5), D_2(6)$ .
2. Оцените последовательность  $D_2(n)$  сверху и снизу.
3. Решите пункты 1 и 2 в трёхмерном пространстве.
4. Найдите  $D_n(n+2), D_n(n+3), D_n(n+4)$ .
5. Верно ли, что существует предел  $\lim_{n \rightarrow \infty} D_n(n+c)$  для любого натурального  $c$ . Если да, то чему он равен?
6. Рассмотрите предыдущий вопрос для последовательности  $D_n(cn^k)$  при фиксированных  $c$  и  $k$ .
7. Верно ли, что  $D_k(n)$  и  $D_k(n+1)$  обязаны отличаться не более чем на 1?

8. Предложите верхнюю и нижнюю оценки для  $D_k(n)$  при фиксированных  $k$ .
9. Обобщите задачу на другие пространства. Попробуйте оценить число различных конфигураций, при которых достигается минимум (с точностью до движений и подобия).

## Задача 4. Циркуляции

Пусть  $G$  - неориентированный граф со множеством рёбер  $E$  и множеством вершин  $V$ . При этом будем допускать в графе  $G$  кратные рёбра и петли. Введём множество  $\bar{E} = \{(e, x, y) | e \in E; x, y \in V; x \text{ и } y \text{ концы ребра } e\}$ , каждый элемент которого задаёт ребро с выбранной ориентацией. Целочисленной циркуляцией на графе  $G$  назовём функцию  $f: \bar{E} \rightarrow \mathbb{Z}$ , удовлетворяющую двум условиям

а)  $f(e, x, y) = -f(e, y, x)$ .

б) Для любой вершины  $x \quad \sum_{\substack{e: \exists y \\ (e, x, y) \in \bar{E}}} f(e, x, y) = 0$  (Закон Кирхгофа).

$k$ -циркуляцией для  $k \geq 2$  называется циркуляция  $f$ , такая что  $0 < |f(x)| < k, x \in \bar{E}$ .

1. Покажите, что если из связного графа  $G$  можно убрать одно ребро  $e$ , так что граф  $G - e$  окажется несвязным (такое ребро будем называть мостом), то на этом графе не существует ни одной  $k$ -циркуляции ни для какого  $k$ .
2. Покажите, что 2-циркуляция на графе без мостов существует тогда и только тогда, когда степень любой вершины чётна.
3. Назовём потоковым числом графа  $G$  наименьшее такое  $k$ , что на  $G$  есть  $k$ -циркуляция. Если такого  $k$  нет, будем говорить, что потоковое число равно  $\infty$ . Будем обозначать это число как  $\eta(G)$ . Верно ли, что если в графе нет мостов, то  $\eta(G) < \infty$ ?
4. Найдите  $\eta(K_{2n+1})$ , для различных  $n$ , где  $K_{2n+1}$  - полный граф на  $2n+1$  вершине.
5. Найдите  $\eta(K_4)$ . Посчитайте, сколько различных  $k$ -циркуляций на  $K_4$ .
6. Найдите  $\eta(K_{2n})$ .

7. Пусть  $P$  - граф Петерсена. Покажите, что на этом графе нет 4-циркуляции. Верно ли, что любой граф, на котором нет 4-циркуляции содержит подразбиение графа  $P$ .
8. Пусть  $H$  - абелева группа, например группа остатков  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ .  $H$ -циркуляцией называется отображение  $f: \bar{E} \rightarrow H$ , удовлетворяющее условиям а) и б). Исследуйте количество  $H$ -циркуляций на различных графах. Напишите оценку количества  $H$ -циркуляций для конечной группы  $H$ .

## Задача 5. Календарь

Рассмотрим окружность радиуса  $n \in \mathbb{N}$  с центром в начале некоторой фиксированной системы координат. Число  $n$  называется календарным, если на этой окружности есть в точности 12 точек с целочисленными координатами.

1. Приведите пример календарных чисел.
2. Бесконечно ли множество календарных чисел?
3. Чему равна плотность множества календарных чисел, то есть предел

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{|\{0 < n \leq x \mid n - \text{календарное}\}|}{x}.$$

4. Рассмотрите вместо окружностей эллипсы, заданные уравнением  $x^2 + qy^2 = n$ , где  $q$  - натуральное число без квадратов. При каких  $q$  есть такое  $n$ , что у этого уравнения есть ровно 12 решений.
5. Рассмотрите «циферблатные» числа, где каждой минуте соответствовала бы точка на окружности с целыми координатами.
6. Какое количество целых решений может быть у уравнения  $x^2 + qy^2 = n$ ?

## Задача 6. Обобщение теоремы Штейнера-Лемуса

1. Пусть задано вещественное положительное число  $n$ . На сторонах  $AB$ ,  $BC$  треугольника  $ABC$  отметим точки  $C_n$  и  $A_n$  соответственно так, что  $\frac{|\widehat{BAA_n}|}{|\widehat{CAA_n}|} = \frac{|\widehat{BCC_n}|}{|\widehat{ACC_n}|} = n$ , где  $|\widehat{CAA_n}|$  обозначает градусную меру угла  $CAA_n$ . Известная теорема Штейнера-Лемуса утверждает, что равенство длин биссектрис  $|AA_1| = |CC_1|$  влечет равенство длин сторон  $|AB| = |BC|$ . Проверьте истинность утверждения: «Отрезки

$AA_n$  и  $CC_n$  имеют равные длины тогда и только тогда, когда стороны  $AB$  и  $BC$  имеют равные длины» в каждом из следующих случаев:

- а)  $n = 2$
  - б)  $n$  - произвольное натуральное число.
  - в)  $n$  - произвольное положительное рациональное число.
  - г)  $n$  - произвольное положительное вещественное число.
2. Сформулируйте и исследуйте аналогичную задачу, если точки  $A_n$  и  $C_n$  выбираются на прямых  $AB$ ,  $BC$  соответственно так, что лучи  $AA_n$ ,  $CC_n$  делят внешние углы при вершинах  $A$  и  $C$  треугольника  $ABC$  в равных отношениях.
3. Предложите свои обобщения или направления исследования в этой задаче и изучите их.

## Задача 7. Иррациональные корни рациональных уравнений

1. Известно, что уравнение  $x^4 + ax^3 + 29x^2 + bx + 4 = 0$  с рациональными коэффициентами имеет корнем число  $2 + \sqrt{3}$ . Найдите остальные корни этого уравнения.
2. Обоснуйте следующее утверждение про рациональные корни уравнения вида  $p(x) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot x^i$  с целыми коэффициентами (если они, конечно, существуют): если  $x_0$  – рациональный корень такого уравнения, то он обязательно равен  $x_0 = \frac{p}{q}$ , где  $p$  – делитель свободного члена (т.е.  $a_0$ ), а  $q$  – делитель  $a_n$ . На основании этого соображения постройте алгоритм нахождения таких корней. Распространите этот алгоритм на уравнения такого же типа с рациональными коэффициентами.
3. Попробуйте предложить алгоритм определения (с обоснованием) корней вида  $a + b \cdot \sqrt{2}, a + b \cdot \sqrt{3}, \dots$  где  $a, b \in \mathbb{Q}$ , для таких уравнений (по крайней мере, постройте алгоритмы определения таких корней).
4. Может, вы сможете определять корни более сложного вида  $a + b \cdot \sqrt{2} + c \cdot \sqrt{3}$  или  $a + b \cdot \sqrt[3]{2}$ ?

5. Предложите алгоритм определения корней исходя из их общего вида, такого как  $a + b \cdot \sqrt{m}$ ,  $a + b \cdot \sqrt{m} + c \cdot \sqrt{k}$  и т.п., где  $m, k, \dots$  – заранее неизвестные натуральные числа.
6. Попробуйте оценить сложность предлагаемых алгоритмов.
7. Рассмотрите корни уравнений еще более сложного вида (с корнями различных степеней или с «композицией» корней и т.п.).
8. Предложите свои обобщения или направления исследования в этой задаче и изучите их (например, попробуйте рассмотреть подобные задачи для систем уравнений с двумя и более переменными, а также уравнения с коэффициентами из множества

$$\mathbb{Q}(\sqrt{2}) = \{x + y \cdot \sqrt{2} | x, y \in \mathbb{Q}\}.$$

## Задача 8. Функция Эйлера

Пусть  $n$  – натуральное число, большее единицы. Обозначим за  $\phi(n)$  количество таких целых  $0 < x < n$ , что  $x$  взаимно просто с  $n$ .

$$\phi(n) = |\{0 < x < n | (x, n) = 1\}|$$

1. Покажите, что для любого  $n \geq 3$  есть такое натуральное число  $k(n)$ , что

$$\underbrace{\phi(\phi(\dots \phi(n)))}_{k(n) \text{ раз}} = \phi^{\circ k(n)}(n) = 2.$$

2. Оцените число  $k(n)$  сверху и снизу, где
  - а)  $n$  – число вида  $\{3^s 2^t\}_{s, t \in \mathbb{N}}$ .
  - б)  $n$  – есть произведение всех различных простых меньших заданного числа.
  - в)  $n$  – произвольное натуральное число.
3. Рассмотрим уравнение  $\phi(n) = m$  относительно  $n$ . Оцените число его решений
  - а) сверху.
  - б) снизу.
4. Обобщите предыдущий пункт на случай уравнений  $\phi(\phi(\dots \phi(n))) = m$ . При каких  $m$  они разрешимы? Какова плотность множества значений функции  $\phi^{\circ k}$ , где плотность понимается в смысле задачи 5.

5. Число  $n$  назовём совершенным, если  $n = \sum_{i=1}^{k(n)+1} \phi^{oi}(n)$ . Докажите, что числа вида  $3^k$  являются совершенными.
6. Постройте другие примеры совершенных чисел. Существуют ли совершенные числа, не делящиеся на 3? Какие числа не являются совершенными?

## Задача 9. Игры с карточками

1. Есть три автомата: первый по карточке с числами  $(a, b)$ ,  $a, b \in \mathbb{Z}$  выдаёт карточку с числами  $(a - b, b)$ ; второй – карточку  $(a + b, b)$ ; третий – карточку  $(b, a)$ . Все автоматы возвращают заложенные в них изначально карточки.
- а) Пусть у вас в начале на руках имеется карточка  $(19, 86)$ . Можно ли получить карточку а)  $(31, 13)$ ; б)  $(12, 21)$ ?
- б) Попробуйте найти все карточки  $(x, y)$ , которые можно получить из карточки  $(19, 86)$ . Докажите, что других карточек получить нельзя.
- в) Пусть у вас имеется карточка с числами  $(a, b)$ . Попробуйте найти все карточки  $(x, y)$ , которые можно получить.
2. Есть три автомата: первый по карточке  $(a, b)$ ,  $a, b \in \mathbb{N}$  выдаёт карточку с числами  $(a + 1, b + 1)$ ; второй – карточку  $(a/2, b/2)$  (он работает только тогда, когда  $a$  и  $b$  чётные); третий – по двум карточкам с числами  $(a, b)$  и  $(b, c)$  печатает карточку с числами  $(a, c)$ . Все автоматы возвращают заложенные в них карточки.
- а) Можно ли с помощью этих операций из карточки  $(5, 19)$  получить карточку а)  $(1, 50)$ ; б)  $(1, 100)$ ?
- б) Найдите все натуральные  $n$ , такие, что можно из карточки  $(5, 19)$  получить карточку  $(1, n)$ . Докажите, что при остальных натуральных  $n$  это сделать не получится.
- в) Определите множество всех карточек  $(m, n)$ ,  $m, n \in \mathbb{N}$ , которые можно получить из карточки  $(5, 19)$ .
3. Пусть первоначально имеется карточка с числами  $(a, b)$ ,  $a, b \in \mathbb{N}$ ,  $a < b$ , и автоматы такие же, как в пункте 2.

- а) Для различных пар  $a, b$  определите, при каких  $n$  можно из заданной карточки  $(a, b)$  получить карточку с числами  $(1, n)$ ? Докажите, что при остальных натуральных  $n$  это сделать не получится.
  - б) Для различных пар  $a, b$  определите множество всех карточек  $(m, n)$ ,  $m, n \in \mathbb{N}$ , которые можно получить из карточки  $(a, b)$ .
  - в) Пусть первоначально имеется набор из  $k$  карточек с числами  $(a_1, b_1), \dots, (a_k, b_k)$ . При каких натуральных  $m$  и  $n$  можно получить карточку с числами  $(m, n)$  (конечно, в зависимости от исходного набора карточек)?
4. Придумайте свои обобщения или направления исследования этой задачи и изучите их. Например, рассмотрите систему автоматов, способных выполнять над карточками какие-нибудь другие операции.

## Задача 10. Числовые квадраты

Возьмем 9 девятиклеточных квадратов.

1. Можно ли разместить в клетках этих квадратов натуральные числа от 1 до 9 так, чтобы затем было возможно соединить все 9 квадратов в один квадратный коврик  $9 \times 9$  таким образом, что одновременно выполняются условия:
  - а) Сумма чисел по каждой диагонали в любом девятиклеточном квадрате равнялась 15.
  - б) Сумма чисел в каждом из четырёх квадратов  $2 \times 2$ , входящих в состав девятиклеточного квадрата, а также сумма чисел, расположенных в клетках, прилегающих к сторонам центрального квадрата, равнялась 16 в первом девятиклеточном квадрате коврика, 17 - во втором, 18 - в третьем и далее последовательно 19, 20, 21, 22, 23, 24.
  - в) В каждом столбце и в каждой строке полного квадрата  $9 \times 9$  содержались бы все числа от 1 до 9 в произвольной последовательности.



2. Можно ли расположить числа так, чтобы сумма чисел по углам каждого из центральных  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$  квадратов оказалась равной 20?
3. Можно ли расположить числа так, чтобы суммы, вдоль прямых, симметричных относительно одной из диагоналей квадрата  $9 \times 9$ , оказались одинаковыми, причём суммы эти уменьшались бы регулярно на 5 единиц по мере удаления прямых от другой диагонали большего квадрата?
4. Можно ли расположить числа так, чтобы кроме предыдущих условий оказалось, что суммы квадратов чисел вдоль прямых, симметричных относительно той же диагонали полного квадрата, оказались одинаковы?
5. Найдите как можно больше дополнительных числовых свойств у образовавшегося полного квадрата и докажите их.
6. Предложите наиболее экономный алгоритм составления требуемого числового квадрата  $9 \times 9$  и обоснуйте его корректность. Сформулируйте аналогичные задачи для квадратов произвольного размера.

## Задача 11. Почти арифметические прогрессии

Попробуйте построить теорию «почти арифметических прогрессий». В качестве исходных направлений исследования могут быть следующие. Пусть  $a_1, d_1, d_2, n$  – фиксированные натуральные числа. Конечную последовательность чисел  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , будем называть почти арифметической прогрессией, если для любого  $k$ ,  $2 \leq k \leq n$ ,  $a_k = a_{k-1} + d_1$  или  $a_k = a_{k-1} + d_2$ . Множество всех таких почти арифметических прогрессий длины  $n$  обозначим через  $P_n(a_1, d_1, d_2)$ .

1. Укажите последовательность  $a_1, a_2, \dots, a_n$  из  $P_n(a_1, d_1, d_2)$ , у которой наименьшее количество членов равняется полусумме своих соседей.
2. Укажите последовательность из  $P_n(a_1, d_1, d_2)$ , у которой среди чисел  $a_1 + a_n, a_2 + a_{n-1}, \dots$  наименьшее количество равных между собой.
3. Сколько различных последовательностей содержит множество

$$P_n(a_1, d_1, d_2)?$$

4. Сколько различных сумм может быть у последовательностей из множества  $P_n(a_1, d_1, d_2)$ ?
5. Какое наибольшее количество последовательностей из  $P_n(a_1, d_1, d_2)$  имеет одинаковую сумму всех своих членов?
6. Пусть  $P_{3n+1}(a_1, 1, 2, 3)$  – множество всех последовательностей  $a_1, \dots, a_{3n+1}$  таких, что при любом  $k$ ,  $2 \leq k \leq 3n+1$  имеет место одно из равенств  $a_k = a_{k-1} + 1$ ,  $a_k = a_{k-1} + 2$ ,  $a_k = a_{k-1} + 3$ . У какого наибольшего количества последовательностей из  $P_{3n+1}(a_1, 1, 2, 3)$  одинаковая сумма всех членов?
7. Сколько различных последовательностей содержит множество

$$P_{3n+1}(a_1, 1, 2, 3)?$$

8. Предложите свои направления исследования или обобщения этой задачи и изучите их.

## Задача 12. Периодические дифференциальные уравнения

1. Дана функция  $f(x, y): \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f \in C(\mathbb{R}^2)$ ,  $f_y \in C(\mathbb{R}^2)$  и  $f(x + T, y) = f(x, y)$  для любых  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ . Далее, существуют такие числа  $a, b$ , что  $f(x, a) \cdot f(x, b) < 0$  для любого вещественного  $x$ .
  - а) Докажите, что дифференциальное уравнение  $y' = f(x, y)$  имеет  $T$ -периодическое решение.
  - б) Докажите, что если  $f_y > 0$ , то это периодическое решение единственно.
2. Дано уравнение  $y' = -y^{2k+1} + f(x)$ ,  $f(x + T) = f(x)$ ,  $f$  - непрерывна на вещественной прямой.
  - а) Докажите, что существует  $T$ -периодическое решение.
  - б) Докажите, что это решение единственно.
3. Найдите все периодические решения уравнения  $y' = (y - a)(y - b)$ , где  $a, b$  - вещественные числа.

Средним за период для периодической функции  $f(x)$  называется величина  $\frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx$ . Ниже везде предполагается, что функции  $f, f_1, f_2 \in C(\mathbb{R})$  и  $T$ -периодические.

4. Дано уравнение  $y' = (y - a)(y - f(x))$ .
  - а) Найдите необходимое и достаточное условие на среднее за период функции  $f$ , при котором это уравнение имеет  $T$ -периодическое решение (отличное от константы).
  - б) Сколько вообще периодических решений может иметь это уравнение?
5. Исследуйте те же вопросы для уравнения  $y' = (y - a)^2(y - f(x))$
6. Проведите исследование уравнения  $y' = (y - a)^m(y - f(x))^n$  на предмет существования периодических решений в зависимости от натуральных параметров  $n, m$  и величины  $\frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx$ .