Элементы теории чисел. Первый семестр, Королев Максим Александрович

Кирилл Яковлев, группа 108

19 сентября 2024 г.

Содержание

Введение. Следующие понятия считаются интуитивно ясными:

1. Понятие натурального ряда $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, 4, 5, \dots\}$.

2. У каждого натурального числа n существует единственное натуральное число $m = n + 1$ следующее за ним.

3. Понятие отрицательных чисел и нуля.

4. Понятие суммы, разности и произведения двух целых чисел.

Аксиома. Если $M \subset \mathbb{N}$ обладает следующими свойствами: $(1 \in M)$ и $(\forall n \in M$ выполнено $n + 1 \in M)$, то $M = \mathbb{N}$.

Следствие 1. Всякое непустое подмножество натурального ряда содержит минимальный элемент.

Следствие 2. Всякое непустое конечное подмножество натурального ряда содержит максимальный элемент.

Следствие 3. (Принцип математической индукции)
Если известно, что некоторое утверждение о натуральных числах выполнено для натурального числа a, а также из предположения о том, что утверждение верно при некотором n следует справедливость этого утверждения и для числа $n+1$, то это утверждение верно для всех натуральных чисел, больше или равных a.

1 Делимость целых чисел

Определение 1.1. Пусть $a, b \in \mathbb{N}, b \neq 0$. Говорят что a делится на b, если существует $c \in \mathbb{Z}$, такое, что $a = bc$.

Замечание. a называется делимым, а b называется делителем числа a. Запись $b \mid a$ означает, что b делит a. Если b не делит a, то пишут $b \nmid a$.

Лемма 1.1. Пусть $a, b, c \in \mathbb{Z}$, тогда:

1. $1 \mid a$.

2. $a \neq 0 \Rightarrow a \mid a$.

3. $a \mid b \Rightarrow a \mid bc$.

4. $a \mid b$ и $b \mid c \Rightarrow a \mid c$.

5. $a \mid b$ и $a \mid c \Rightarrow a \mid (b+c)$.

6. $a \mid b$ и $b \neq 0 \Rightarrow |a| \leq |b|$.

Теорема 1.1. Если $a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{N}$, то единственная пара целых чисел q и r, такие, что $a = bq + r$, где $0 \leq r \leq b - 1$.

Доказательство. Докажем существование: Если a делится на b, то $a = bc$. В таком случае возьмем $q = c, r = 0$. Теперь пусть a не делится на b. Рассмотрим непустое множество M целых чисел, представимых в виде $a = kb, k \in \mathbb{Z}$, возьмем $k = -(|a|+1)$, тогда $a - kb = b(|a|+1) + a \geq b(|a|+1) - |a| \geq 1 \cdot (|a|+1) - |a| = 1 \Rightarrow a - kb$ - натуральное. Значит у M есть минимальный элемент $a - kb$. Возьмем $q = k, r = a - kb = a - bq > 1$. Осталось показать, что $0 \leq r \leq b - 1$. Предположим, что $r \geq b$. Если $r = b$, то $a = bq + b = b(q+1)$ получаем противоречие, так как a не делится на b. Значит $r = b + m, m \geq 1$. Получаем $1 \leq m = r - b < r$, при этом $a = bq + r = bq + b + m = b(q+1) + m \Rightarrow m = a - b(q+1) \Rightarrow m \in M$ и $m < r$, получаем противоречие, так как a не делится на b. Доказано, что $r < b \Rightarrow$ представление $a = bq + r$ - искомое. Докажем единственность: предположим, что для некоторого a и b имеются пары чисел с указаным свойством: q, r и q_1, r_1, причем $0 \leq r \leq r_1 \leq b - 1$. Тогда $a = bq + r = bq_1 + r_1 \Rightarrow 0 \leq b(q - q_1) = r_1 - r$. Значит b делит разность $r_1 - r$. Допустим, что $q \neq q_1$, тогда по пункту 6 леммы 1 получаем $b \leq r_1 - r$ и в то же время $r_1 - r \leq b - 1 < b$. Получаем противоречие, значит $q = q_1$, а значит и $r = r_1$. □

2 Наименьшее общее кратное и наибольший общий делитель (НОК и НОД)

Определение 2.0. $n \geq 2, a_1, \ldots, a_n \in \mathbb{N}$ пусть натуральное число k делится на каждое из этих чисел. Тогда k - общее кратное чисел $a_1, \ldots, a_n$.
Пусть $a_1, \ldots, a_n$ - целые числа не все равные нулю. Натуральное число d называется общим делителем $a_1, \ldots, a_n$, если d делит каждое из этих чисел.

Замечание. Множество таких k непусто, в нем лежит, например произведение всех этих чисел.
Множество таких d конечно: если $a_i \neq 0$, то d находится среди делителей числа a_i, (по пункту 6 леммы 1.1) $d \leq |a_i|$, значит числа d образуют конечное множество, оно непусто, так как содержит единицу.

Определение 2.1. Наименьшее натуральное число, делящееся на каждое из чисел $a_1, \ldots, a_n$ называют их наименьшим общим кратным, его обозначают $[a_1, \ldots, a_n]$.

Теорема 2.1. Каждое общее кратное натуральных чисел $a_1, \ldots, a_n$ делится на их НОК.

Доказательство. Пусть M - общее кратное $a_1, \ldots, a_n$, $K = [a_1, \ldots, a_n]$. Поделим M на K с остатком: $M = kq + r, 0 \leq r \leq k - 1 \leq k$. Допустим, что $K \neq 0$. По определению, всякое число a_i делит оба числа M и $K \Rightarrow a_i$ делит разность $k = M - qK$, значит k является общим кратным для $a_1, \ldots, a_n$, но $k < K$, получаем противоречие т.к какое-то кратное оказалось меньше минимального. Значит $k = 0$ и $M = qK$. $\square$

Определение 2.2. Наибольшее из натуральных чисел d делящих каждое из чисел $a_1, \ldots, a_n$, называют наибольшим общим делителем $a_1, \ldots, a_n$, его обозначают $(a_1, \ldots, a_n)$.

Определение 2.3. Числа a и b называется взаимнопростыми, если $(a, b) = 1$. Числа $a_1, \ldots, a_n$ называются взаимнопростыми в совокупности, если $(a_1, \ldots, a_n) = 1$. Числа $a_1, \ldots, a_n$ попарно взаимнопросты, если $(a_i, a_j) = 1$ $\forall i, j : 1 \leq i < j \leq n$.

Теорема 2.2. $[a, b] \cdot (a, b) = ab, \forall a, b \in \mathbb{N}$.

Доказательство. ab - общее кратное a и b. По теореме 2.1 ab делится на $[a, b]$, то есть $ab = c[a, b]$, где $c \geq 1$ - натуральное число. Покажем, что a и b делятся на c. Действительно $a = \frac{ab}{[a,b]} \cdot \frac{[a,b]}{b} = c \cdot \frac{[a,b]}{b}$, $b = \frac{ab}{[a,b]} \cdot \frac{[a,b]}{a} = c \cdot \frac{[a,b]}{a}$, но оба числа $\frac{[a,b]}{a}$ и $\frac{[a,b]}{b}$ - натуральные, значит c - общий делитель a и b. Пусть теперь d - произвольный общий делитель a и b, тогда $\frac{ab}{d} = a \cdot \frac{b}{d}$, то есть число $\frac{ab}{d}$ делится нацело на каждое из чисел a и b. По теореме 2.1, оно делится на $[a, b]$, то есть $\frac{ab}{d} = [a, b]m$, где $m \geq 1$ - натуральное число, но тогда $\frac{ab}{[a,b]} = c = dm$, то есть d делит c. В силу пункта 6 леммы 1 $d \leq c$, значит $c = (a, b)$. $\square$

Теорема 2.3. Пусть $a, b, c \in \mathbb{N}$, причем $a \mid bc$ и $(a, b) = 1$, тогда $a \mid c$.

Доказательство. $(a, b) = 1 \Rightarrow$ (по теореме 2.2) bc делится нацело на $[a, b] = ab$, то есть $bc = abm$, где $m \geq 1$ - натуральное число. Сократим обе части на b, получим $c = am$. $\square$

Теорема 2.4. Пусть $\Delta = (a, b) \geq 1 \Rightarrow (\frac{a}{\Delta}, \frac{b}{\Delta}) = 1$.

Доказательство. Пусть $m \in \mathbb{N}$ и $m \mid \frac{a}{\Delta}, m \mid \frac{b}{\Delta}$ предположим, что $m > 1 \Rightarrow cm = \frac{a}{\Delta}, dm = \frac{b}{\Delta} \Rightarrow \Delta cm = a, \Delta dm = b \Rightarrow \Delta m \mid a$ и $\Delta m \mid b \Rightarrow \Delta m$ - общий делитель a и b. Но т.к $m > 1$, то $\Delta m > \Delta \Rightarrow \Delta = (a, b) \leq \Delta m$ - противоречие, поскольку Δ - НОД $\Rightarrow m = 1 \Rightarrow (\frac{a}{\Delta}, \frac{b}{\Delta}) = 1$. □

3 Алгоритм Евклида

Лемма 3.1. Пусть $a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{N}$ и $b \mid a$. Тогда $(a, b) = b$.

Доказательство. Пусть $(a, b) = c \Rightarrow c \mid b \Rightarrow$ (по лемме 1.1) $c \leq b$, но $b \mid a$, $b \mid b \Rightarrow b$ - общий делитель a и $b \Rightarrow b \leq c \Rightarrow b = c = (a, b)$. □

Лемма 3.2. Пусть $a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{N}, a = bq + r : r, q \in \mathbb{Z}, r \geq 0$. Тогда $(a, b) = (b, r)$.

Доказательство. Пусть $\Delta = (a, b), \delta = (b, r)$. Имеем $\delta \mid b \Rightarrow b \mid bq, b \mid r \Rightarrow$ (лемма 1.1) $\delta \mid bq + r = a \Rightarrow \delta \mid a, \delta \mid b \Rightarrow \delta$ - общий делитель a и $b \Rightarrow \delta \leq \Delta$.
$\Delta \mid b, \Delta \mid bq, \Delta \mid a \Rightarrow$ (лемма 1.1) $\Delta \mid a - bq = r \Rightarrow \Delta$ - общий делитель b и $r \Rightarrow \Delta \leq \delta \Rightarrow \Delta = \delta$. □

Алгоритм. Получаем, что при поиске НОД a и $b, (a, b)$ можно заменять любой парой $(b, r) = (b, a - bq), q \in \mathbb{Z}$. Положим $r_0 = a, r_1 = b$.
Выполняем деление с остатком:
$r_0 = r_1 q_1 + r_2, 0 < r_2 < r_1 \Rightarrow (r_0, r_1) = (r_1, r_2)$,
$r_1 = r_2 q_2 + r_3, 0 < r_3 < r_2 \Rightarrow (r_1, r_2) = (r_2, r_3)$,
$r_2 = r_3 q_3 + r_4, 0 < r_4 < r_3 \Rightarrow (r_2, r_3) = (r_3, r_4)$,
$\vdots$
$r_{n-2} = r_{n-1} q_{n-1} + r_n, 0 < r_n < r_{n-1} \Rightarrow (r_{n-2}, r_{n-1}) = (r_{n-1}, r_n)$,
$r_{n-1} = r_n q_n \Rightarrow$ (лемма 3.1) $(r_{n-1}, r_n) = r_n \Rightarrow (a, b) = r_n$.

4 Решение в целых числах линейного уравнения с двумя неизвестными

Рассмотрим уравнение $(*)$ $ax + by = c$, такое, что $a, b, c \in \mathbb{Z}, a$ и b не равняются нулю одновременно. $x, y \in \mathbb{Z}$ - неизвестные.

Теорема 4.1. (1) Уравнение $(*)$ разрешимо $\Leftrightarrow \Delta = (a, b) \mid c$.
(2) В случае разрешимости, множество решений этого уравнения бесконечно, все решения имеют вид $x = x_0 + \frac{b}{\Delta}t, y = y_0 - \frac{a}{\Delta}t$, где x_0, y_0 - произвольное решение, а $t \in \mathbb{Z}$.

Доказательство. Докажем первый пункт:

($\Rightarrow$) Если x, y - решение, то $\Delta \mid ax, \Delta \mid by \Rightarrow$ (лемма 1.1) $\Delta \mid ax + by \Rightarrow \Delta \mid c$.

($\Leftarrow$) Не теряя общности, можем считать, что $a \geq b \geq 0$. Доказываем индукцией по сумме $a + b$.
База: $a + b = 1 \Rightarrow b = 0$ и $a = 1 \Rightarrow$ уравнение имеет вид $ax = c \Rightarrow x = c$. Можем предъявить решение $x = c, y = 0$. В этом случае $\Delta = (1, 0) \mid 1$.
Шаг: $n \geq 1$, считаем, что утверждение доказано для всех уравнений с условием $a \geq b \geq 0$, $1 \leq a + b \leq n$. Пусть $ax + by = c$, где $a \geq b \geq 0$,
$a + b = n + 1$ и $\Delta = (a, b) \mid c \Rightarrow$ докажем, что есть хотя бы одно решение. Пусть $b = 0, ax = c, \Delta = (a, 0) = a, a \mid c \Rightarrow c = am \Rightarrow x = m, y = 0$ - решение. Пусть $b \geq 1$. Рассмотрим уравнение $(a - b)X + bY = c$,
$a - b \geq 0, b \geq 1 > 0$. $(a-b)+b = (a+b)-b = n+1-b \leq n$. $(a-b, b) = (a, b) \mid c$
$\Rightarrow$ по предположению индукции есть целочисленное решение X_0, X_0.
$(a - b)X_0 + bY_0 = c \Rightarrow aX_0 - b(Y_0 - X_0) \Rightarrow x = X_0, y = Y_0 - X_0$ - решение.
Докажем второй пункт (проверим, что x_0, y_0 - решение):
$a(x_0 + \frac{b}{\Delta}t) + b(y_0 - \frac{a}{\Delta}t) = ax_0 + \frac{ab}{\Delta}t + ay_0 - \frac{ab}{\Delta}t = ax_0 + by_0$. Обратно: пусть x_0, y_0 и x, y - различные решения. $ax_0 + by_0 = c, ax + by = c$
$\Rightarrow a(x - x_0) + b(y - y_0) = 0 \Rightarrow a(x - x_0) = b(y_0 - y)$. $\Delta = (a, b)$
$\Rightarrow a = \alpha\Delta, b = \beta\Delta \Rightarrow$ (теорема 2.4) $(\alpha, \beta) = 1$
$\Rightarrow \alpha\Delta(x - x_0) = \beta\Delta(y_0 - y) \Rightarrow \alpha(x - x_0) = \beta(y_0 - y)$
$\Rightarrow \alpha \mid \beta(y_0 - y) \Rightarrow \alpha \mid (y_0 - y) \Rightarrow y_0 - y = \alpha t \Rightarrow \alpha(x - x_0) = \beta\alpha t$
$\Rightarrow x - x_0 = \beta t$.

□

5 Простые числа

Определение 5.1. Натуральное число $n > 1$ называется простым, если оно имеет ровно два делителя: 1 и n. В противном случае это число называется составным.

Замечание. Единица не причисляется ни к простым, ни к составным.

Лемма 5.1. Наименьший делитель натурального числа $n > 1$, отличный от единицы - простое число.

Доказательство. Пусть $d \mid n, 1 \leq d \leq n$, и d - наименьший с этими свойствами. Пусть d - составное. Тогда $\exists k : k \mid d$ и $1 < k < d$. По лемме 1.1 $k \mid n$, но $1 < k < d$ - противоречие с тем, что d - минимальный. □

Теорема 5.1. Множество простых чисел бесконечно.

Доказательство. Пусть множество простых конечно: $p_1 < p_2 < \cdots < p_n$ - все простые числа. Рассмотрим число $N = p_1 p_2 \dots p_n + 1$. По лемме 5.1 наименьший делитель $p > 1$ числа N - простое число. Но p отлично от $p_1 \dots p_k, p$ делит N нацело, а N при делении на каждое из $p_1 \dots p_n$ дает остаток 1 - противоречие. $\square$

Пусть $x > 0$, через $\pi(x)$ обозначим количество простых чисел на отрезке $[0, x]$ ($\pi(x)$ - количество простых чисел не превосходящих x).

$$\pi(x) = \sum_{p \leq x} 1$$

Теорема 5.1 $\Leftrightarrow \pi(x)$ - не ограничена сверху $\Leftrightarrow \pi(x) \to +\infty$ при $x \to +\infty$.
Гипотеза Лежандра: $\pi(x) = \frac{x}{\ln x - C}$, где $C = 1,08366$. Позднее Гаусс выдвенет более сложное и более точное предположение. Из доказательства теоремы Чебышева: $\forall \varepsilon > 0 \exists x_0 = x_0(\varepsilon)$, т.ч. $\forall x \geq x_0$ выполнено неравенство:

$$(A - \varepsilon)\frac{x}{\ln x} < \pi(x) < (B + \varepsilon)\frac{x}{\ln x}$$

где $A = \ln(\frac{2^{\frac{1}{2}} 3^{\frac{1}{3}} 5^{\frac{1}{5}}}{30^{\frac{1}{30}}})$ и $B = \frac{6}{5}A$.
Асимптотический закон распределения простых чисел:

$$\lim_{x \to +\infty} = 1 \Leftrightarrow A = B = 1 \Leftrightarrow \pi(x) = (1 + \bar{o}(1))\frac{x}{\ln x}$$

Лемма 5.2. Пусть N - составное число, p - наименьший простой делитель. Тогда $p \leq \sqrt{N}$.

Доказательство. N - составное $\Rightarrow \exists a, b : 1 < a < N, 1 < b < N$ и $ab = N$. Значит $a \mid N, b \mid N, p$ - наименьший $\Rightarrow p \leq a, p \leq b \Rightarrow p^2 \leq ab = N$
$\Rightarrow p \leq \sqrt{N}$. $\square$

Решето Эратосфена. Выписываем все числа от 2 до N, первое число в таблице - простое, это 2. Вычеркиваем все числа кратные 2, кроме нее самой. Первое невычеркнутое число после 2 - это 3 - значит оно простое. Вычеркиваем все числа, кратные 3, кроме самой 3. Первое невычеркнутое число после 3 - простое и т.д. После того как найдено наибольшее простое p не превосходящее $\sqrt{N}$ и вычеркнуты все числа кратные p, в таблице останутся лишь простые числа, не превосходящие N и только они.

Теорема 5.2. (Основная теорема арифметики)
Каждое целое число, большее 1, раскладывается в произведение простых чисел, притом единственным способом (с точностью до порядка сомножителей).

Доказательство. Существование:
Индукция по $n > 1$. Числа $n = 2, n = 3$ - простые, для них это утверждение справедливо. Пусть $n > 3$ и допустим, справедливость утверждения проверки для всех $m < n$. Если n - простое, то утверждение очевидно. Пусть n - составное. По лемме 5.1 его наименьший делитель - простое число $\Rightarrow n = p_1 k$, но $k = \frac{n}{p_1} \leq \frac{n}{2} < n$. По предположению индукции $k = p_2 \dots p_r$, где $p_2, \dots, p_r$ - простые. $\Rightarrow n = p_1 k = p_1 p_2 \dots p_r$ - искомое разложение.
Единственность:
Пусть $n = p_1 \dots p_n = q_1 \dots q_r$, где p_i, q_i - простые числа и $r \leq s$. Тогда
$p_1 \dots p_r = q_1 a_1$, где $a_1 = q_2 \dots q_s \Rightarrow p_1 \mid q_1 a_1$. Возможно два случая:
1) $(p, q) > 1 \Rightarrow p_1 = q_1$.
2) $(p, q) = 1 \Rightarrow$ (Теорема 2.3) $p_1 \mid a_1 = q_2 \dots q_s, a_1 = q_2 a_2, a_2 = q_3 \dots q_s$,
$p_1 \mid q_2 a_2 \Rightarrow$ либо $p_1 = q_2$, либо $p_1 \mid a_2$ и т.д. Но $a_1 > a_2 > \dots \geq 1 \Rightarrow$ на одном из шагов обязательно будет иметь место равенство $p_1 = q_k, k \leq s$ (иначе оказалось бы, что $p_1 \mid 1$, а это невозможно). Итак p_1 совпадает с одним из чисел $q_1, \dots, q_s$. Будем считать, что $p_1 = q_1 \Rightarrow p_2 \dots p_r = q_2 \dots q_s$ продолжаем рассуждение и получаем, что p_2 совпадает с одним из $q_2, \dots q_s$, пусть $p_2 = q_2$ и т.д. Если $r < s$ после r шагов получили бы противоречивое равенство: $1 = q_{r+1} \dots q_1$
$\Rightarrow r = s$ и множества $\{p_1, \dots, p_r\}$ и $\{q_1, \dots, q_s\}$ совпадают. □

Замечание. $n > 1, n = q_1 \dots q_s \Rightarrow n$ можно записать в виде $n = p_1^{\alpha_1} \dots p_k^{\alpha_k}$,
$p_1 < p_2 < \dots < p_k$ - каноническое разложение n на простые сомножители.

Определение 5.2. Пусть $n = p_1^{\alpha_1} \dots p_k^{\alpha_k}, p$ - простое. Тогда

$$\nu_p(n) = \begin{cases} 0, \text{ если } p \nmid n, \\ \alpha, \text{ если} p = p_i. \end{cases}$$