

# Математическая логика

Михайлов Максим

25 ноября 2022 г.

# Оглавление

<b>Лекция 1</b>	<b>12 февраля</b>	<b>4</b>
0	Мотивация . . . . .	4
0.1	Математикам . . . . .	4
0.2	Программистам . . . . .	5
1	Исчисление высказываний . . . . .	5
1.1	Язык . . . . .	5
1.2	Метаязык и предметный язык . . . . .	5
1.3	Сокращения записи . . . . .	6
1.4	Теория моделей . . . . .	6
1.5	Теория доказательств . . . . .	7
1.6	Правило Modus Ponens и доказательство . . . . .	7
<b>Лекция 2</b>	<b>19 февраля</b>	<b>8</b>
2	Интуиционистская логика . . . . .	11
2.1	ВНК-интерпретация (Brouwer–Heyting–Kolmogorov) . . . . .	11
<b>Лекция 3</b>	<b>26 февраля</b>	<b>13</b>
2.2	Естественный (натуральный) вывод . . . . .	13
2.3	Теория решеток . . . . .	14
<b>Лекция 4</b>	<b>5 марта</b>	<b>17</b>
2.4	Табличные модели . . . . .	17
2.5	Модели Крипке . . . . .	18
<b>Лекция 5</b>	<b>12 марта</b>	<b>20</b>
3	Изоморфизм Карри-Ховарда . . . . .	20
3.1	Алгебраические типы . . . . .	20
3.2	Применение восьмой аксиомы интуиционистской логики . . . . .	21
4	Исчисление предикатов . . . . .	22
4.1	Язык исчисления предикатов . . . . .	22
4.2	Теория моделей . . . . .	23
4.3	Теория доказательств . . . . .	24
<b>Лекция 6</b>	<b>19 марта</b>	<b>25</b>
4.4	Вхождение . . . . .	25
4.5	Свобода для подстановки . . . . .	26
<b>Лекция 7</b>	<b>2 апреля</b>	<b>28</b>
4.6	Полнота исчисления предикатов . . . . .	28
<b>Лекция 8</b>	<b>9 апреля</b>	<b>32</b>

4.7	Теорема Гёделя о полноте исчисления предикатов . . . . .	32
4.8	Неразрешимость исчисления предикатов . . . . .	34
<b>Лекция 9</b>	<b>16 апреля</b>	<b>36</b>
5	Теория первого порядка . . . . .	36
5.1	Аксиоматика Пеано . . . . .	36
5.2	Формальная арифметика . . . . .	38
<b>Лекция 10</b>	<b>30 апреля</b>	<b>40</b>
6	Арифметизация математики . . . . .	40
6.1	Рекурсивные функции . . . . .	40
6.2	Проблема останова . . . . .	42
<b>Лекция 11</b>	<b>7 мая</b>	<b>45</b>
7	Гёделева нумерация . . . . .	45
7.1	Самоприменение . . . . .	46
<b>Лекция 12</b>	<b>14 мая</b>	<b>49</b>
8	Теория множеств . . . . .	49
<b>Лекция 13</b>	<b>21 мая</b>	<b>53</b>
8.1	Аксиома выбора . . . . .	53
8.2	Мощность множеств . . . . .	54

# Лекция 1

## 12 февраля

### 0 Мотивация

#### 0.1 Математикам

**Аксиома** (Архимеда). Для любого  $k > 0$  найдётся  $n$ , такое что  $kn > 1$ .

Под эту аксиому не подходят бесконечно малые числа и это является проблемой. Например,  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} = 0 = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x^2}$ , но мы хотим уметь различать эти два числа. Ньютон предложил идею бесконечно малых чисел, откуда пошли последовательности. Возникает вопрос — что такое последовательность и что такое число?

Общепринятое определение целых чисел  $\mathbb{N}$  происходит из теории множеств. Однако эта теория содержит в себе множество фундаментальных парадоксов, от которых нельзя избавиться.

Возникает вопрос — а что такое множество? Посмотрим на некоторое множество  $A = \{x \mid x \notin x\}$ . Содержит ли оно себя,  $A \in A$ ? На этот вопрос нельзя ответить, это называется парадокс Рассела. Есть простой способ его разрешить — запретить ставить такой вопрос. Нет вопроса — нет парадокса. Существование такого парадокса ставит под вопрос существование любого множества — а существует ли  $\mathbb{N}$ ? Может быть его существование парадоксально, просто мы не нашли этот парадокс. Пришло чуть более умное решение парадокса — запретим множества, содержащие себя. Таким образом вывели аксиоматику теории множеств (Цермело — Френкеля).

*Пример.* Рассмотрим множество всех чисел, которые можно задать в  $\leq 1000$  слов русского языка. Фраза “наименьшее число, которое нельзя задать в  $\leq 1000$  слов” содержит  $\leq 1000$  слов, т.е. такое число принадлежит искомому множеству — парадокс.

Возникает идея — человеческий язык порождает парадоксы, поэтому нужно задать новый язык, который их не порождает. Этот язык и является математической логикой.

## 0.2 Программистам

Математическая логика применяется в двух областях (*для программистов*):

1. Языки программирования
2. Формальные доказательства

Для языков программирования матлогика применима как теория типов (*переменных*).

Формальные доказательства нужны например для smart-контрактов, где корректность программы критически важна, т.к. если в нём есть ошибка, у вас злоумышленник заберет все деньги, а вы не сможете этот контракт откатить.

# 1 Исчисление высказываний

## 1.1 Язык

**Определение.** Язык содержит в себе:

1. Пропозициональные переменные

$A_i$  — большая буква начала латинского алфавита, возможно с индексом и/или штрихом.

2. Связки

Пусть  $\alpha, \beta$  — высказывания. Тогда  $(\alpha \rightarrow \beta), (\alpha \& \beta), (\alpha \vee \beta), (\neg \alpha)$  — высказывания.

$\alpha, \beta$  называются **метапеременными**.

*Примечание.* Математическая логика алгеброподобна (*а не анализоподобна*), т.к. в ней много определений и мало доказательств.

## 1.2 Метаязык и предметный язык

У нас есть два различных языка — **предметный язык** и **метаязык**. Метаязык — русский, предметный язык мы определили выше.

*Пример.*  $\alpha \rightarrow \beta$  — метавыражение;  $A \rightarrow (A \rightarrow A)$  — предметное выражение.

*Обозначение.* Метапеременные обозначаются различными способами в зависимости от того, что они обозначают:

- Буквы греческого алфавита ( $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \varphi, \psi$ ) — выражения
- Заглавные буквы конца латинского алфавита ( $X, Y, Z$ ) — произвольные переменные

*Пример.*  $X \rightarrow Y \Rightarrow A \rightarrow B$  — подстановка переменных. Этот синтаксис не формален, мы будем записывать так:

$$(X \rightarrow Y)[X := A, Y := B] \equiv A \rightarrow B$$

*Соглашение.* символы логических операций не пишутся в метаязыке.

*Пример.*

$$\begin{aligned} (\alpha \rightarrow (A \rightarrow X))[\alpha := A, X := B] &\equiv A \rightarrow (A \rightarrow B) \\ (\alpha \rightarrow (A \rightarrow X))[\alpha := (A \rightarrow P), X := B] &\equiv (A \rightarrow P) \rightarrow (A \rightarrow B) \end{aligned}$$

### 1.3 Сокращения записи

- $\vee, \&, \neg$  — скобки слева направо (*лево-ассоциативные операции*) (*не коммутативные*)
- $\rightarrow$  — правоассоциативная.

*Примечание.* Здесь операторы записаны в порядке их приоритета

*Пример.* Расставим скобки в следующем выражении:

$$\begin{aligned} A \rightarrow B \& C \rightarrow D \\ A \rightarrow ((B \& C) \rightarrow D) \end{aligned}$$

### 1.4 Теория моделей

**Модель** состоит из:

*Обозначение.*

- $P$  — некоторое множество предметных переменных
  - $\tau$  — множество высказываний предметного языка
  - $V$  — множество истинностных значений. Классическое —  $\{\text{П}, \text{Л}\}$
  - $\llbracket \cdot \rrbracket : \tau \rightarrow V$  — оценка высказывания (*высказывание ставится в скобки*).
1.  $\llbracket x \rrbracket : P \rightarrow V$  — задается при оценке.
  2.  $\llbracket \alpha \star \beta \rrbracket = \llbracket \alpha \rrbracket \star \llbracket \beta \rrbracket$ , где  $\star$  есть логическая операция ( $\vee, \&, \neg, \rightarrow$ ), а  $\star$  определено естественным образом как элемент метаязыка.

## 1.5 Теория доказательств

**Определение. Схема высказывания** — строка, соответствующая определению высказывания + метапеременные.

*Пример.*

$$(\alpha \rightarrow (\beta \rightarrow (A \rightarrow \alpha)))$$

10 схем аксиом:

1.  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$
2.  $(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \rightarrow \gamma)$
3.  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha \ \& \ \beta$
4.  $\alpha \ \& \ \beta \rightarrow \alpha$
5.  $\alpha \ \& \ \beta \rightarrow \beta$
6.  $\alpha \rightarrow \alpha \vee \beta$
7.  $\beta \rightarrow \alpha \vee \beta$
8.  $(\alpha \rightarrow \gamma) \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \vee \beta \rightarrow \gamma)$
9.  $(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\alpha \rightarrow \neg \beta) \rightarrow \neg \alpha$
10.  $\neg \neg \alpha \rightarrow \alpha$

## 1.6 Правило Modus Ponens и доказательство

**Определение. Доказательство (вывод)** есть конечная последовательность высказываний  $\alpha_1 \dots \alpha_n$ , где  $\alpha_i$  — либо аксиома, либо  $\exists k, l < i : \alpha_k \equiv \alpha_l \rightarrow \alpha_i$  (*правило Modus Ponens*)

*Пример.*  $\vdash A \rightarrow A$

- |  |            |
|--|------------|
| 1. $A \rightarrow A \rightarrow A$   | сх. акс. 1 |
| 2. $A \rightarrow (A \rightarrow A) \rightarrow A$   | сх. акс. 1 |
| 3. $(A \rightarrow (A \rightarrow A)) \rightarrow (A \rightarrow (A \rightarrow A) \rightarrow A) \rightarrow (A \rightarrow A)$ | сх. акс. 2 |
| 4. $(A \rightarrow (A \rightarrow A) \rightarrow A) \rightarrow (A \rightarrow A)$   | М.Р. 1, 3  |
| 5. $A \rightarrow A$   | М.Р. 2, 4  |

**Определение.** Доказательство  $\alpha_1 \dots \alpha_n$  доказывает выражение  $\beta$ , если  $\alpha_n \equiv \beta$

## Лекция 2

# 19 февраля

*Обозначение.* Большая греческая буква середины греческого алфавита ( $\Gamma, \Delta, \Sigma$ ) — список высказываний.

**Определение** (следование).  $\alpha$  следует из  $\Gamma$  (обозначается  $\Gamma \models \alpha$ ), если  $\Gamma = \gamma_1 \dots \gamma_n$  и всегда, когда все  $\llbracket \gamma_i \rrbracket = \text{И}$ , то  $\llbracket \alpha \rrbracket = \text{И}$ .

*Пример.*  $\models \alpha \rightarrow \alpha$  общезначимо.

**Определение.** Теория Исчисление высказываний **корректно**, если при любом  $\alpha$  из  $\vdash \alpha$  следует  $\models \alpha$ .

**Определение.** Исчисление **полно**, если при любом  $\alpha$  из  $\models \alpha$  следует  $\vdash \alpha$ .

**Теорема 1** (о дедукции).

$$\Gamma, \alpha \vdash \beta \Leftrightarrow \Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta$$

*Доказательство.*

$\Leftarrow$  Пусть  $\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta$ , т.е. существует доказательство  $\delta_1 \dots \delta_n$ , где  $\delta_n \equiv \alpha \rightarrow \beta$

Построим новое доказательство:  $\delta_1 \dots \delta_n, \alpha$  (гипотеза),  $\beta$  (М.Р.). Эта новая последовательность — доказательство  $\Gamma, \alpha \vdash \beta$

$\Rightarrow$  Рассмотрим  $\delta_1 \dots \delta_n, \Gamma, \alpha \vdash \beta$ . Рассмотрим последовательность  $\sigma_1 = \alpha \rightarrow \delta_1 \dots \sigma_n = \alpha \rightarrow \delta_n$ . Это не доказательство.

Но эту последовательность можно дополнить до доказательства, так что каждый  $\sigma_i$  есть аксиома, гипотеза или получается через М.Р. Докажем это.

*Доказательство. База:*  $n = 0$  — очевидно.

**Переход:** пусть  $\sigma_0 \dots \sigma_n$  — доказательство. Покажем, что между  $\sigma_n$  и  $\sigma_{n+1}$  можно добавить формулы так, что  $\sigma_{n+1}$  будет доказуемо.



У нас есть 3 варианта обоснования  $\delta_{n+1}$

1.  $\delta_{n+1}$  — аксиома или гипотеза,  $\neq \alpha$

Будем нумеровать дробными числами, потому что нам ничто это не запрещает, т.к. нам нужна только упорядоченность.

$n + 0.2$   $\delta_{n+1}$  — верно, т.к. это аксиома или гипотеза

$n + 0.4$   $\delta_{n+1} \rightarrow \alpha \rightarrow \delta_{n+1}$  (аксиома 1)

$n + 1$   $\alpha \rightarrow \delta_{n+1}$  (М.Р.  $n + 0.2, n + 0.4$ )

2.  $\delta_{n+1} \equiv \alpha$

$n + 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$  — доказательство  $\alpha \rightarrow \alpha$

3.  $\delta_k \equiv \delta_l \rightarrow \delta_{n+1}, k, l \leq n$

$k$   $\alpha \rightarrow (\delta_l \rightarrow \delta_{n+1})$

$l$   $\alpha \rightarrow \delta_l$

$n + 0.2$   $(\alpha \rightarrow \delta_l) \rightarrow (\alpha \rightarrow (\delta_l \rightarrow \delta_{n+1})) \rightarrow (\alpha \rightarrow \delta_{n+1})$  (аксиома 2)

$n + 0.4$   $(\alpha \rightarrow \delta_l \rightarrow \delta_{n+1}) \rightarrow (\delta \rightarrow \delta_{n+1})$  (М.Р.  $n + 2, l$ )

$n + 1$   $\alpha \rightarrow \delta_{n+1}$  (М.Р.  $n + 0.4, k$ )

□

□

**Теорема 2.** Пусть  $\vdash \alpha$ . Тогда  $\models \alpha$ .

*Доказательство.* Индукция по длине доказательства: каждая  $\llbracket \delta_i \rrbracket = \text{И}$ , если  $\delta_1 \dots \delta_n$  — доказательство  $\alpha$

Рассмотрим  $n$  и пусть  $\llbracket \delta_1 \rrbracket = \text{И}, \dots, \llbracket \delta_n \rrbracket = \text{И}$ .

Тогда рассмотрим основание  $\delta_{n+1}$

1.  $\delta_{n+1}$  — аксиома. Это упражнение.

*Пример.*  $\delta_{n+1} \equiv \alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$

$$\triangleleft \llbracket \alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha \rrbracket^{\llbracket \alpha \rrbracket := a, \llbracket \beta \rrbracket := b} = \text{И}$$

$a$	$b$	$\beta \rightarrow \alpha$	$\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$
Л	Л	И	И
Л	И	Л	И
И	Л	И	И
И	И	И	И

Аналогично можно доказать для остальных аксиом.

2.  $\delta_{n+1} - \text{М.Р. } \delta_k = \delta_l \rightarrow \delta_{n+1}$

Фиксируем оценку. Тогда  $\llbracket \delta_k \rrbracket = \llbracket \delta_l \rrbracket = \text{И}$ . Тогда:

$\llbracket \delta_k \rrbracket$	$\llbracket \delta_{n+1} \rrbracket$	$\llbracket \delta_k \rrbracket = \llbracket \delta_l \rightarrow \delta_{n+1} \rrbracket$
Л	Л	И
Л	И	И
И	Л	Л
И	И	И

Первых трёх вариантов не может быть в силу  $\llbracket \delta_k \rrbracket = \llbracket \delta_l \rrbracket = \text{И}$ . Таким образом,  $\llbracket \delta_{n+1} \rrbracket = \text{И}$ .

□

**Теорема 3** (о полноте). Пусть  $\models \alpha$ . Тогда  $\vdash \alpha$ .

Фиксируем набор переменных из  $\alpha$ :  $P_1 \dots P_n$ .

Рассмотрим  $\llbracket \alpha \rrbracket^{P_1 := x_1 \dots P_n := x_n} = \text{И}$

*Обозначение.*  ${}_{[\beta]}\alpha \equiv \begin{cases} \alpha, & \llbracket \beta \rrbracket = \text{И} \\ \neg \alpha, & \llbracket \beta \rrbracket = \text{Л} \end{cases}$  и  ${}_{[x]}\alpha \equiv \begin{cases} \alpha, & x = \text{И} \\ \neg \alpha, & x = \text{Л} \end{cases}$

Докажем, что  $\underbrace{{}_{[x_1]}P_1, \dots, {}_{[x_n]}P_n}_{\Pi} \vdash {}_{[\alpha]}\alpha$

*Доказательство.* По индукции по длине формулы:

**База:**  $\alpha = P_i$   ${}_{[P_i]}P_i \vdash {}_{[P_i]}P_i$ , значит  $\Pi \vdash {}_{[P_i]}P_i$

**Переход:** пусть  $\eta, \zeta : \Pi \vdash {}_{[\eta]}\eta, \Pi \vdash {}_{[\zeta]}\zeta$  (по индукционному предположению). Покажем, что  $\Pi \vdash {}_{[\eta \star \zeta]}\eta \star \zeta$ , где  $\star$  — все связки

Это упражнение.

□

**Лемма 1.**  $\Gamma, \eta \vdash \zeta, \Gamma, \neg \eta \vdash \zeta$ . Тогда  $\Gamma \vdash \zeta$ .

*Доказательство.*

1.  $\alpha$  ( $\in \Gamma$ )
2.  $\alpha \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \alpha)$  (a. 1)
3.  $\neg\beta \rightarrow \alpha$  (M.P. 1,2)
4.  $\neg\alpha$  ( $\in \Gamma$ )
5.  $\neg\alpha \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \neg\alpha)$  (a. 1)
6.  $\neg\beta \rightarrow \neg\alpha$  (M.P. 4,5)
7.  $(\neg\beta \rightarrow \alpha) \rightarrow (\neg\beta \rightarrow \neg\alpha) \rightarrow \neg\neg\beta$  (a. 9)
8.  $(\neg\beta \rightarrow \neg\alpha) \rightarrow \neg\neg\beta$  (M.P. 3,7)
9.  $\neg\neg\beta$  (M.P. 6,8)
10.  $\neg\neg\beta \rightarrow \beta$  (a. 10)
11.  $\beta$  (M.P. 9,10)

□

*Доказательство теоремы о полноте.*  $\models \alpha$ , т.е.  $[x_1]P_1 \dots [x_n]P_n \vdash_{[\alpha]} \alpha$ . Но  $\llbracket \alpha \rrbracket = \Pi$  при любой оценке. Тогда  $[x_1]P_1 \dots [x_n]P_n \vdash \alpha$  при все  $x_i$ .

**Лемма 2** (об исключении допущения). Если  $[x_1]P_1 \dots [x_n]P_n \vdash \alpha$  и  $[x_1]P_1 \dots [x_n]\neg P_n \vdash \alpha$ , то  $[x_1]P_1 \dots [x_{n-1}]P_{n-1} \vdash \alpha$

$$\left. \begin{array}{l} [x_1]P_1 \dots [x_{n-1}]P_{n-1}, P_n \vdash \alpha \\ [x_1]P_1 \dots [x_{n-1}]P_{n-1}, \neg P_n \vdash \alpha \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{по лемме}} [x_1]P_1 \dots [x_{n-1}]P_{n-1} \vdash \alpha$$

□

## 2 Интуиционистская логика

### 2.1 ВНК-интерпретация (Brouwer–Heyting–Kolmogorov)

Определим выражения:

- $\alpha \& \beta$  — есть  $\alpha$  и  $\beta$
- $\alpha \vee \beta$  — есть  $\alpha$  либо  $\beta$  и мы знаем, какое
- $\alpha \rightarrow \beta$  — есть способ перестроить  $\alpha$  в  $\beta$
- $\perp$  — конструкция без построения (*bottom*)
- $\neg\alpha \equiv \alpha \rightarrow \perp$

**Теория доказательств** есть классическая логика без десятой схемы аксиомы, вместо нее  $\alpha \rightarrow \neg\alpha \rightarrow \beta$

**Теория моделей** — теория, в которой  $\llbracket \alpha \rrbracket$  — открытое множество в  $\Omega$  — топологическом пространстве.

В ней определено следующее:

$$\begin{aligned}\llbracket \alpha \ \&\ \beta \rrbracket &= \llbracket \alpha \rrbracket \cap \llbracket \beta \rrbracket \\ \llbracket \alpha \ \vee \ \beta \rrbracket &= \llbracket \alpha \rrbracket \cup \llbracket \beta \rrbracket \\ \llbracket \alpha \rightarrow \beta \rrbracket &= ((X \setminus \llbracket \alpha \rrbracket) \cup \llbracket \beta \rrbracket)^\circ \\ \llbracket \perp \rrbracket &= \emptyset \\ \llbracket \neg\alpha \rrbracket &= (X \setminus \llbracket \alpha \rrbracket)^\circ\end{aligned}$$

# Лекция 3

## 26 февраля

### 2.2 Естественный (натуральный) вывод

Рассмотрим новый способ записи доказательств — в виде деревьев, называемый естественным выводом.

Тогда язык будет состоять из переменных  $A \dots Z, \vee, \&, \perp, \vdash, -$

У нас используются следующие правила вывода:

1.  $\frac{}{\Gamma \vdash \gamma, \gamma \in \Gamma}$  (аксиома)
2.  $\frac{\Gamma, \varphi \vdash \psi}{\Gamma \vdash \varphi \rightarrow \psi}$  (введение  $\rightarrow$ )
3.  $\frac{\Gamma \vdash \varphi \quad \Gamma \vdash \psi}{\Gamma \vdash \varphi \& \psi}$  (введение  $\&$ )
4.  $\frac{\Gamma \vdash \varphi \rightarrow \psi \quad \Gamma \vdash \varphi}{\Gamma \vdash \psi}$  (удаление  $\rightarrow$ )
5.  $\frac{\Gamma \vdash \varphi \& \psi}{\Gamma \vdash \varphi}$  (удаление  $\&$ )
6.  $\frac{\Gamma \vdash \varphi \& \psi}{\Gamma \vdash \psi}$  (удаление  $\&$ )
7.  $\frac{\Gamma \vdash \varphi}{\Gamma \vdash \psi \vee \varphi}$  (введение  $\vee$ )
8.  $\frac{\Gamma \vdash \psi}{\Gamma \vdash \psi \vee \varphi}$  (введение  $\vee$ )
9.  $\frac{\Gamma \vdash \perp}{\Gamma \vdash \varphi}$  (удаление  $\perp$ )

$$10. \frac{\Gamma, \varphi \vdash \rho \quad \Gamma, \psi \vdash \rho \quad \Gamma \vdash \varphi \vee \psi}{\Gamma \vdash \rho}$$

$$\text{Пример. } \frac{\overline{A \vdash A} \text{ (акс.)}}{\vdash A \rightarrow A} \text{ (введение } \rightarrow \text{)}$$

$$\text{Пример. } \frac{\overline{A \& B \vdash A \& B} \text{ (акс.)} \quad \overline{A \& B \vdash A \& B} \text{ (акс.)}}{\frac{A \& B \vdash B \quad A \& B \vdash A}{A \& B \vdash B \& A} \text{ (введение } \rightarrow \text{)}} \vdash A \& B \rightarrow B \& A$$

## 2.3 Теория решеток

**Определение.**

- **Частичный порядок** — рефлексивное, транзитивное, антисимметричное отношение.
- **Линейный порядок** — сравнимы любые два элемента.
- **Наименьший элемент**  $S$  — такой  $k \in S$ , что если  $x \in S$ , то  $k \leq x$
- **Минимальный элемент**  $S$  — такой  $k \in S$ , что нет  $x \in S$ , что  $x \leq k$
- **Множество верхних граней**  $a$  и  $b$  :  $\{x \mid a \leq x \& b \leq x\}$ .
- **Множество нижних граней**  $a$  и  $b$  :  $\{x \mid x \leq a \& x \leq b\}$ .
- $a + b$  — наименьший элемент множества верхних граней (может не существовать).
- $a \cdot b$  — наибольший элемент множества нижних граней.
- **Решетка** — множество + отношение, где для каждого  $a, b$  есть как  $a + b$ , так и  $a \cdot b$ .
- **Дистрибутивная решетка** — если всегда  $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$

**Лемма 3.** В дистрибутивной решетке  $a + b \cdot c = (a + b)(a + c)$

**Определение.**

- **Псевдополнение**  $a$  и  $b$  обозначается  $a \rightarrow b$  и равно наибольшему элементу множества  $\{c \mid a \cdot c \leq b\}$
- **Импликативная решетка** — решетка, где  $\forall a, b \exists a \rightarrow b$
- $0$  — наименьший элемент решетки.
- $1$  — наибольший элемент решетки.
- **Псевдобулева алгебра (алгебра Гейтинга)** — импликативная решетка с нулём.
- **Булева алгебра** — псевдобулева алгебра, такая что  $a + (a \rightarrow 0) = 1$

*Пример.*

$$\begin{array}{ccc} 1 & \longrightarrow & b \\ \downarrow & & \downarrow \\ a & \longrightarrow & 0 \end{array}$$

$$a \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot b = b$$

$$a \cdot b = 0$$

$$a + b = 1$$

**Лемма 4.** В импликативной решетке всегда есть 1.

*Доказательство.* Возьмём  $a \rightarrow a = 1$  для некоторого  $a$ .

$$a \rightarrow a = \mathbf{n}\{x \mid a \cdot x \leq a\} = \mathbf{n}(A)$$

Таким образом,  $A$  имеет наибольший элемент и это  $a \rightarrow a$  □

**Теорема 4.**

- Любая алгебра Гейтинга — модель интуиционистского исчисления высказываний.
- Любая булева алгебра — модель классического исчисления высказываний.

**Определение** (топология). Рассмотрим множество  $X$ , называемое “носитель” и  $\Omega \subset \mathcal{P}(X)$  — подмножество подмножеств  $X$ , называемое “топология”, такое что:

1.  $\bigcup_{\alpha} x_i \in \Omega$ , где  $x_i \in \Omega$
2.  $\bigcap_{i=1}^n x_i \in \Omega$ , где  $x_i \in \Omega$
3.  $\emptyset \in \Omega, X \in \Omega$

*Пример.* Пусть  $X$  — узлы дерева,  $\Omega$  — все множества узлов, которые содержат узлы вместе со всеми потомками.

**Определение.**

$$X^{\circ} \stackrel{\text{def}}{=} \text{наиб}\{w \mid w \subseteq X, w \text{ — открыто}\}$$

**Теорема 5.** Пусть  $(X, \Omega)$  — топологическое пространство,  $a + b = a \cup b$ ,  $a \cdot b = a \cap b$ ,  $a \rightarrow b = ((X \setminus a) \cup b)^{\circ}$ ,  $a \leq b \Leftrightarrow a \subseteq b$ , тогда  $(\Omega, \leq)$  есть алгебра Гейтинга.

*Пример.* Дискретная топология —  $\Omega = \mathcal{P}(X)$ . Тогда  $(\Omega, \leq)$  — булева алгебра.

1.  $X^\circ = X$

2.  $a \rightarrow 0 = (X \setminus a \cup \emptyset) = X \setminus a$

Таким образом,  $a + (a \rightarrow 0) = a + X \setminus a = X$

**Определение.** Пусть  $X$  — все формулы логики. Определим отношение порядка  $\alpha \leq \beta$  это  $\alpha \vdash \beta$ . Будем говорить, что  $\alpha \approx \beta$ , если  $\alpha \vdash \beta$  и  $\beta \vdash \alpha$ .

$(X/\approx, \leq)$  есть алгебра Гейтинга.

**Определение.**  $(X/\approx, \leq)$  — алгебра Линденбаума, где  $X, \approx$  из интуиционистской логики.

**Теорема 6.** Алгебры Гейтинга — полная модель интуиционистской логики.

*Доказательство.*  $\models \alpha$  — истинно в любой алгебре Гейтинга, в частности в  $(X/\approx, \leq)$ .  $\llbracket \alpha \rrbracket = 1$ , т.е.  $\llbracket \alpha \rrbracket = \llbracket A \rightarrow A \rrbracket$ , т.е.  $\alpha \in [A \rightarrow A]_{\approx}$ , т.е.  $A \rightarrow A \vdash \alpha$ .  $\square$



# Лекция 4

## 5 марта

**Определение. Полный порядок** — линейный, где в каждом подмножестве есть наименьший элемент. Множество с полным порядком называют **вполне упорядоченным**.

*Пример.*  $\mathbb{N}$  — вполне упорядоченное множество

$\mathbb{R}$  — не вполне упорядоченное множество, т.к.  $(a, b)$  не имеет наименьшего  $\forall a, b$ . Кроме того,  $\mathbb{R}$  не имеет наименьшего.

**Определение. Предпорядок** — транзитивное, рефлексивное отношение.

Как мы знаем из домашнего задания, по предпорядку можно построить частичный порядок, сжав компоненты связности в классы эквивалентности.

### 2.4 Табличные модели

**Определение. Табличная модель** для интуиционистского исчисления высказываний:

- $V$  — множество истинностных значений
- $f_{\rightarrow}, f_{\&}, f_{\vee} : V^2 \rightarrow V$
- Выделенное истинное значение  $T \in V$
- Оценка переменных  $\llbracket P_i \rrbracket \in V, f_{\mathcal{P}} : P_i \rightarrow V$

И  $\llbracket P_i \rrbracket = f_{\mathcal{P}}(P_i), \llbracket \alpha \star \beta \rrbracket = f_{\star}(\llbracket \alpha \rrbracket, \llbracket \beta \rrbracket), \llbracket \neg \alpha \rrbracket = f_{\neg}(\llbracket \alpha \rrbracket)$

$\models \alpha$  означает, что  $\llbracket \alpha \rrbracket = T$  при любой  $f_{\mathcal{P}}$

**Определение. Конечная** табличная модель — табличная модель с конечным  $V$ .

**Теорема 7.** У интуиционистского исчисления высказываний не существует корректной полной конечной табличной модели.

Неформально эта теорема говорит, что нельзя считать, что в интуиционистской логике есть три значения — истинна, ложь и “неизвестно”.

## 2.5 Модели Крипке

Идея моделей Крипке следующая: общезначимое утверждение истинно во всех мирах.

**Определение** (модели Крипке).

1.  $W = \{W_i\}$  — множество миров
2.  $\leq$  — частичный порядок на  $W$
3. Отношение вынужденности  $W_j \Vdash P_i$ , где  $P_i$  — переменная, т.е.  $(\Vdash) \subset W \times \mathcal{P}$

При этом, если  $W_j \Vdash P_i$  и  $W_j \leq W_k$ , то  $W_k \Vdash P_i$

**Определение.**

- $W_i \Vdash \alpha$  и  $W_i \Vdash \beta$ , тогда (*и только тогда*)  $W_i \Vdash \alpha \& \beta$
- $W_i \Vdash \alpha$  или  $W_i \Vdash \beta$ , тогда (*и только тогда*)  $W_i \Vdash \alpha \vee \beta$
- Пусть во всех  $W_i \leq W_j$  всегда, когда  $W_j \Vdash \alpha$ , имеет место  $W_j \Vdash \beta$ . Тогда  $W_i \Vdash \alpha \rightarrow \beta$
- $W_i \Vdash \neg \alpha$  значит, что  $\alpha$  не вынуждено нигде, начиная с  $W_i$ :  $W_i \leq W_j \Rightarrow W_j \nVdash \alpha$

**Теорема 8.** Если  $W_i \Vdash \alpha$  и  $W_i \leq W_j$ , то  $W_j \Vdash \alpha$

**Определение.** Если  $W_i \Vdash \alpha$  при всех  $W_i \in W$ , то  $\models \alpha$

**Теорема 9.** ИИВ корректно в моделях Крипке.

*Доказательство.* Рассмотрим  $(W, \Omega)$  — топологию, где  $\Omega = \{w \subset W \mid \text{если } w_i \in w, w_i \leq w_j, \text{ то } w_j \in w\}$ . Это можно представить как множество подлесов, где любая вершина входит со своими потомками.

$\{W_k \mid W_k \Vdash P_j\}$  — открытое множество, что очевидно из определения  $\Omega$  и  $\Vdash$ .

Примем  $\llbracket P_i \rrbracket = \{W_k \mid W_k \Vdash P_j\}$  и аналогично  $\llbracket \alpha \rrbracket = \{W_k \mid W_k \Vdash \alpha\}$ . Корректность этого определения докажем в ДЗ.

Поскольку любая топология является корректной моделью ИИВ, искомое доказано.  $\square$

*Доказательство теоремы о нетабличности.* Предположим обратное, т.е. существует конечная табличная модель,  $|V| = n$ .

Рассмотрим следующую формулу:

$$\varphi_n = \bigvee_{\substack{1 \leq i, j \leq n+1 \\ i \neq j}} (P_i \rightarrow P_j \& P_j \rightarrow P_i)$$

1.  $\not\models \varphi_n$ . Почему? Рассмотрим последовательность миров, таких что  $W_i \models P_i$ , состоящую из  $n + 1$  мира. Тогда  $W_i \not\models (P_i \rightarrow P_j) \& (P_j \rightarrow P_i)$ , т.к.  $W_i \not\models P_j$ , но  $W_i \models P_i$ , таким образом  $\not\models (P_i \rightarrow P_j) \& (P_j \rightarrow P_i)$  и  $\not\models \bigvee (P_i \rightarrow P_j) \& (P_j \rightarrow P_i)$ , а значит  $\not\models \varphi_n$
2.  $\models \varphi_n$  в  $V$  по принципу Дирихле:  $\exists i \neq j : \llbracket P_i \rrbracket = \llbracket P_j \rrbracket$ , а значит  $\llbracket P_i \rightarrow P_j \rrbracket = \text{И}$ , и соответственно  $\llbracket \varphi_n \rrbracket = \text{И}$ .

Т.к.  $\models \varphi_n$ , то  $\vdash \varphi_n$ , но это не так — противоречие.  $\square$

**Теорема 10** (Дизъюнктивность ИИВ).  $\vdash \alpha \vee \beta$  влечет  $\vdash \alpha$  или  $\vdash \beta$

**Определение. Алгебра Гёделя** — алгебра Гейтинга, в которой из  $a + b = 1$  следует  $a = 1$  или  $b = 1$

**Определение.** Пусть  $\mathcal{A}$  — алгебра Гейтинга. Тогда  $\Gamma(\mathcal{A})$  получается переименовыванием 1 в  $\omega$  и добавлением нового элемента  $1_{\Gamma(\mathcal{A})}$ , являющегося единицей для новой алгебры.

**Теорема 11.**  $\Gamma(\mathcal{A})$  есть алгебра Гейтинга и  $\Gamma(\mathcal{A})$  Гёделева.

*Доказательство.* Очевидно.  $\square$

**Определение. Гомоморфизм алгебр Гейтинга** — отображение  $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ , где  $\mathcal{A}, \mathcal{B}$  — алгебры Гейтинга,  $\varphi(a \star b) = \varphi(a) \star \varphi(b)$ ,  $\varphi(1_{\mathcal{A}}) = 1_{\mathcal{B}}$ ,  $\varphi(0_{\mathcal{A}}) = 0_{\mathcal{B}}$

**Теорема 12.** Если  $a \leq b$ , то  $\varphi(a) \leq \varphi(b)$

**Определение.** Пусть  $\alpha$  — формула ИИВ,  $f, g$  — оценки ИИВ, где  $f : \text{ИИВ} \rightarrow \mathcal{A}$ ,  $g : \text{ИИВ} \rightarrow \mathcal{B}$ . Тогда  $\varphi$  **согласовано** с  $f, g$ , если  $\varphi(f(\alpha)) = g(\alpha)$

**Теорема 13.** Если  $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  согласована с  $f, g$  и  $\llbracket \alpha \rrbracket_g \neq 1_{\mathcal{B}}$ , то  $\llbracket \alpha \rrbracket_f \neq 1_{\mathcal{A}}$

*Доказательство теоремы 10.* Рассмотрим алгебру Линденбаума  $\mathcal{L}$ ,  $\Gamma(\mathcal{L})$  и  $\varphi : \Gamma(\mathcal{L}) \rightarrow \mathcal{L}$  — гомоморфизм.

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1_{\mathcal{L}}, & x = \omega \\ 1_{\mathcal{L}}, & x = 1_{\Gamma(\mathcal{L})} \\ x, & \text{иначе} \end{cases}$$

Пусть  $\vdash \alpha \vee \beta$ . Тогда  $\llbracket \alpha \vee \beta \rrbracket_{\Gamma(\mathcal{L})} = 1_{\Gamma(\mathcal{L})}$ , но по Гёделеваемости  $\Gamma(\mathcal{L})$   $\llbracket \alpha \rrbracket = 1$  или  $\llbracket \beta \rrbracket = 1$ .

Пусть  $\not\models \alpha$  и  $\not\models \beta$ . Тогда  $\varphi(\llbracket \alpha \rrbracket) \neq 1_{\mathcal{L}}$  и  $\varphi(\llbracket \beta \rrbracket) \neq 1_{\mathcal{L}}$ . Тогда  $\llbracket \alpha \rrbracket_{\Gamma(\mathcal{L})} \neq 1_{\mathcal{L}}$ ,  $\llbracket \beta \rrbracket \neq 1_{\mathcal{L}}$  — противоречие.  $\square$

# Лекция 5

## 12 марта

### 3 Изоморфизм Карри-Ховарда

*Примечание.* Эта тема в нашем курсе рукомахательная.

Пусть  $p$  — программа, т.е. функция, принимающая  $\alpha$  и возвращающая  $\beta$ , т.е.  $p : \alpha \rightarrow \beta$

Можем посмотреть на это с другой стороны:  $p$  доказательство, что из  $\alpha$  следует  $\beta$ , например в Haskell  $f\ a = a$  гласит, что  $f$  доказывает, что  $A \rightarrow A$ , где подразумевается  $\forall A$ .

Такое сопоставление программам доказательств и высказываниям типов называется изоморфизмом Карри-Ховарда:

логическое исчисление	типизированное $\lambda$ -исчисление
логическая формула	тип
доказательство	программа
доказуемая формула	обитаемый тип
$\rightarrow$	функция
$\&$	упорядоченная пара
$\vee$	алгебраический тип ( <i>тип-сумма</i> )

*Примечание.* Обитаемый тип — тип, у которого есть хотя бы один экземпляр.

Несложно заметить, что логика, соответствующая  $\lambda$ -исчислению, является интуиционистской, поэтому мы её в основном изучаем.

#### 3.1 Алгебраические типы

Рассмотрим следующее определение списка в Pascal:

```

type list : record
  nul : boolean;
  case nul of
    true: ;
    false: next ^list
  end
end;

```

Рассмотрим то же самое в C, опустив bool и скажем, что `nul = (next == null)` (это в какой-то степени костыльно):

```

struct list {
  next: *list;
}

```

Определим таким же способом дерево:

```

struct tree {
  tree* left;
  tree* right;
  int value;
}

```

Это ещё более костыльно, т.к. то, является ли вершина листом, закодировано в неявном виде.

**Определение.** Отмеченное (дизъюнктивное) объединение множеств  $A, B$  обозначается  $A \sqcup B$  или  $A \uplus B$ <sup>1</sup> и равно  $\{\langle "A", a \rangle \mid a \in A\} \cup \{\langle "B", b \rangle \mid b \in B\}$ .

*Примечание.* Это определение интуиционистское по своей сути, т.к. если дано  $s \in A \sqcup B$ , то мы знаем, из какого множества  $s$ .

**Определение.** Тип, соответствующий такому объединению множеств, называется **алгебраическим**

*Пример.* В C++ такой тип реализован как `std::variant<...>`

*Пример.* Список в Haskell:

```

data List a = nil | Cons a (List a)

```

## 3.2 Применение восьмой аксиомы интуиционистской логики

Вспомним восьмую аксиому интуиционистской<sup>2</sup> логики и запишем её как правило натурального вывода:

<sup>1</sup> или ещё десятком других символов

<sup>2</sup> и классической

$$\frac{\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \gamma \quad \Gamma \vdash \beta \rightarrow \gamma \quad \Gamma \vdash \alpha \vee \beta}{\Gamma \vdash \gamma}$$

Рассмотрим программу в Haskell, которая преобразует список в строку:

```
let rec string_of_list l =
  match l with
  | Nil -> "Nil"
  | Cons(head, tail) -> head ^ ":" ^ string_of_list tail
```

Подставим в рассматриваемую аксиому соответствующие значения:

$$\frac{\Gamma \vdash Nil \rightarrow string \quad \Gamma \vdash list \rightarrow string \quad \Gamma \vdash Nil \vee list}{\Gamma \vdash string}$$

Несложно заметить, что эта аксиома описывает match в Haskell — мы даем выражения после “->”, т.е. правила Nil -> string, list -> string и элемент Nil или list, а match возвращает string.

## 4 Исчисление предикатов

### 4.1 Язык исчисления предикатов

Выражения в этом языке бывают двух видов:

1. Логические выражения, называемые “предикаты” или “формулы”
2. Предметные выражения, называемые “термы”

$\theta$  — метаварiable для термов.

Термы бывают двух видов:

- Атомы:
  - Предметные переменные обозначаются буквами  $a, b, c \dots$
  - Метаварiable обозначаются буквами  $x, y, z$
- Применение функциональных символов:
  - Функциональные символы:  $f, g, h$  и записывается  $f(\theta_1 \dots \theta_n)$
  - Метаварiable тоже обозначается  $f$

Логические выражения:

- Применение предикатных символов  $P(\theta_1, \dots \theta_n)$ , где  $P$  — метаварiable для предикатных символов, а предикатный символ —  $A, B, C \dots$
- Связки  $\&, \vee, \neg, \rightarrow$  с правилами из языка классической логики.

- Кванторы <sup>3</sup>  $\forall x.\varphi$  или  $\exists x.\varphi$ , где  $\varphi$  — любое логическое выражение.

Мы используем жадность кванторов. <sup>4</sup> Это значит, что квантор берет в  $\varphi$  все, пока не встретит конец выражения или скобку, которая оканчивает этот квантор.

Пример.  $\forall x.P(x) \& \forall y.P(y) \equiv \forall x.(P(x) \& (\forall y.P(y)))$

## 4.2 Теория моделей

Определим оценку формулы в исчислении предикатов:

1. Фиксируем  $D$  — предметное множество,  $V = \{И, Л\}$
2. Каждому  $f_i(x_1 \dots x_n)$  сопоставим функцию  $f_{f_i} : D^n \rightarrow D$
3. Каждому  $P_j(x_1 \dots x_m)$  сопоставим функцию <sup>5</sup>  $f_{p_m} : D^m \rightarrow V$
4. Каждой  $x_i$  сопоставим  $f_{x_i} \in D$ 
  - $\llbracket x \rrbracket = f_{x_i}$
  - $\llbracket \alpha \star \beta \rrbracket$  — так же, как в исчислении высказываний.
  - $\llbracket P_i(\theta_1 \dots \theta_n) \rrbracket = f_{p_i}(\llbracket \theta_1 \rrbracket \dots \llbracket \theta_n \rrbracket)$
  - $\llbracket f_j(\theta_1 \dots \theta_n) \rrbracket = f_{f_j}(\llbracket \theta_1 \rrbracket \dots \llbracket \theta_n \rrbracket)$
  - $\llbracket \forall x.\varphi \rrbracket = \begin{cases} И, & \text{если } \llbracket \varphi \rrbracket = И \text{ при всех } k \in D \\ Л, & \text{иначе} \end{cases}$
  - $\llbracket \exists x.\varphi \rrbracket = \begin{cases} И, & \text{если } \llbracket \varphi \rrbracket = И \text{ при некотором } k \in D \\ Л, & \text{иначе} \end{cases}$

Пример.  $\forall x.\forall y.E(x, y)$

Пусть  $D = \mathbb{N}$ ,  $E(x, y) = \begin{cases} И, & x = y \\ Л, & x \neq y \end{cases}$

$\llbracket \forall x.\forall y.E(x, y) \rrbracket_{x:=1, y:=2} = Л$ , т.к.  $\llbracket E(x, y) \rrbracket = Л$ .

Вспомним определение предела последовательности из матанализа:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N \quad \forall n > N \quad |a_n - a| < \varepsilon$$

<sup>3</sup> По записи кванторов нет общепринятого соглашения.

<sup>4</sup> В отношении жадности кванторов также нет соглашения; встречается запись, где квантор — унарная операция, аналогичная  $\neg$

<sup>5</sup>, называемую предикат

Перепишем это определение с богомерзкого языка матанализа на православный язык исчисления предикатов.<sup>6</sup>

Пусть  $(>)(a, b) = G(a, b)$ ,  $|a| = m_+(a)$ ,  $(-)(a, b) = m_-(a, b)$ ,  $m_a : n \mapsto a_n$ ,  $0() = m_0$

$$\forall \varepsilon. \varepsilon \rightarrow 0 \exists N. \forall n. (n > N) \rightarrow (|a_n - a| < \varepsilon)$$

$$\forall \varepsilon. \varepsilon \rightarrow 0 \exists N. \forall n. (n > N) \rightarrow (|a_n - a| < \varepsilon)$$

$$\forall e. G(e, m_0) \exists n_0. \forall n. G(n, n_0) \rightarrow G(e, m_+(m_-(m_a(n), a)))) < \varepsilon)$$

### 4.3 Теория доказательств

Все аксиомы исчисления высказываний + Modus Ponens + две схемы аксиом + два правила:

1.  $(\forall x. \varphi) \rightarrow \varphi[x := \theta]$
2.  $\varphi[x := \theta] \rightarrow \exists x. \varphi$

Обе эти схемы применимы только если  $\theta$  свободен для подстановки вместо  $x$  в  $\varphi$ , т.е. никакое свободное вхождение  $x$  в  $\theta$  не станет связным.

*Пример.*

```
int f(int x) {
    x = y;
}
```

После замены  $y := x$  код станет следующим:

```
int f(int x) {
    x = x;
}
```

И код потеряет свой смысл.

Правила следующие:

1.  $\frac{\varphi \rightarrow \psi}{\varphi \rightarrow (\forall x. \psi)}$  (правило  $\forall$ )
2.  $\frac{\psi \rightarrow \varphi}{(\exists x. \psi) \rightarrow \varphi}$  (правило  $\exists$ )

---

<sup>6</sup> Это термины лектора, все претензии от адептов матанализа и других религий — к нему.



# Лекция 6

## 19 марта

Пример.  $\frac{\varphi \rightarrow \psi}{\exists x.(\varphi \rightarrow \psi)}$  — возможно доказуемо, но это не правило вывода для  $\exists$ .

**Определение.**  $\alpha_1 \dots \alpha_n$  — **доказательство**, если выполняется одно из:

1.  $\alpha_i$  — аксиома
2. Существует  $j, k < i$ , такие что  $\alpha_k = \alpha_j \rightarrow \alpha_i$
3. Существует  $j$ , такое что  $\alpha_j = \varphi \rightarrow \psi$  и  $\alpha_i = (\exists x.\varphi) \rightarrow \psi$ , причём  $x$  не входит свободно в  $\psi$ .
4. Существует  $j$ , такое что  $\alpha_j = \psi \rightarrow \varphi$  и  $\alpha_i = \psi \rightarrow \forall x.\varphi$ , причём  $x$  не входит свободно в  $\psi$ .

### 4.4 Вхождение

Рассмотрим некоторую формулу и рассмотрим вхождения  $x$  в неё:

$$(P(\underbrace{x}_1) \vee Q(\underbrace{x}_2)) \rightarrow (R(\underbrace{x}_3) \& (\overbrace{\forall \underbrace{x}_4. P_1(\underbrace{x}_5)}) )$$

Область действия  $\forall$  по  $x$

- Вхождение 4 связывающее
- Вхождение 5 связано вхождением 4
- Вхождения 1-3 свободны.

Случай множественного связывания:

$$\underbrace{\forall x. \forall y. \overbrace{\forall x. \forall y. \underbrace{\forall x. P(x)}}}_{\text{Область действия } \forall \text{ по } x}$$

Область действия  $\forall$  по  $x$

**Определение.** Вхождение **свободно**, если не связано.

*Примечание.* Свободно входящие переменные нельзя переименовывать, т.к. к формуле могут приписать кванторы, которые используют данные имена переменных. Это ограничение не распространяется на связанные переменные.

Любая аксиома есть предикат.

#### 4.5 Свобода для подстановки

**Определение.**  $\theta$  **свободен для подстановки** вместо  $x$  в  $\varphi$ , если никакая свободная переменная в  $\theta$  не станет связанной в  $\varphi[x := \theta]$

*Обозначение.*  $\varphi[x := \theta]$  — заменить все свободные вхождения  $x$  в  $\varphi$  на  $\theta$

*Пример.*

$$\begin{aligned} (\forall x. \forall y. \forall x. P(x))[x := y] &\equiv \forall x. \forall y. \forall x. P(x) \\ P(x) \vee \forall x. P(x)[x := y] &\equiv P(y) \vee \forall x. P(x) \\ (\forall y. x = y)[x := y] &\equiv \forall y. y = y \end{aligned}$$

В этой формуле новый  $y$  связался.

*Примечание.* В определении можно опустить “свободная” в нашем исчислении, но это не верно в достаточно извращенных исчислениях.

**Лемма 5.** Пусть  $\vdash \alpha$ . Тогда  $\vdash \forall x. \alpha$

*Доказательство.* Т.к.  $\vdash \alpha$ , то существует  $\gamma_1 \dots \gamma_n : \gamma_n \equiv \alpha$

Создадим новое доказательство.

$$\begin{array}{ll} (1) & \gamma_1 \\ & \vdots \\ (n) & \gamma_n \\ (n+1) & A \& A \rightarrow A \quad \text{(акс.)} \\ (n+2) & \alpha \rightarrow ((A \& A \rightarrow A) \rightarrow \alpha) \quad \text{(акс.)} \\ (n+3) & (A \& A \rightarrow A) \rightarrow \alpha \quad \text{(М.Р. } n, n+2) \\ (n+4) & (A \& A \rightarrow A) \rightarrow \forall x. \alpha \quad \text{(введение } \forall) \\ (n+5) & \forall x. \alpha \quad \text{(М.Р. } n+1, n+4) \end{array}$$

□

**Лемма 6.**  $(\alpha \rightarrow \varphi \rightarrow \psi) \rightarrow \alpha \& \varphi \rightarrow \psi$

**Лемма 7.**  $(\alpha \& \varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (\alpha \rightarrow \varphi \rightarrow \psi)$

*Доказательство двух лемм.* По теореме о полноте исчисления высказываний.

□

**Теорема 14** (о дедукции). Пусть даны  $\Gamma, \alpha, \beta$ .

1. Если  $\Gamma, \alpha \vdash \beta$ , то  $\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta$  при условии, если в доказательстве  $\Gamma, \alpha \vdash \beta$  не применялись правила для  $\forall, \exists$  по переменным, входящим свободно в  $\alpha$ .
2. Если  $\Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta$ , то  $\Gamma, \alpha \vdash \beta$ .

*Доказательство.* По индукции. Пусть доказано  $\alpha \rightarrow \delta_i$  для  $i \in [1, n]$ , докажем  $\alpha \rightarrow \delta_{n+1}$ .

Рассмотрим случаи:

1. Схемы аксиом 1-10 — аналогично<sup>1</sup>.
2. М.Р. — аналогично
3. Аксиомы 11-12 — аналогично первому пункту.
4. Пусть  $\delta_{n+1}$  получено правилом  $\forall : \delta_{n+1} \equiv \varphi \rightarrow \forall x.\psi$  и существует  $\delta_k \equiv \varphi \rightarrow \psi$  и  $k \leq n$ , причём  $x$  не входит свободно в  $\varphi$ .

При этом в новом доказательстве уже доказано  $\alpha \rightarrow \delta_k$

$$\begin{array}{lll}
 (1) & \alpha \rightarrow \delta_1 & \\
 & \vdots & \\
 (k) & \alpha \rightarrow (\varphi \rightarrow \psi) & \\
 & \vdots & \\
 (n) & \alpha \rightarrow \delta_n & \\
 & \vdots & \\
 (n+0.1) & (\alpha \rightarrow \varphi \rightarrow \psi) \rightarrow \alpha \& \varphi \rightarrow \psi & \text{(лемма 6)} \\
 (n+0.2) & \alpha \& \varphi \rightarrow \psi & \text{(М.Р.)} \\
 (n+0.3) & \alpha \& \varphi \rightarrow \forall x.\psi & \text{(введение } \forall) \\
 (n+0.4) & (\alpha \& \varphi \rightarrow \forall x.\psi) \rightarrow (\alpha \rightarrow \varphi \rightarrow \forall x.\psi) & \text{(лемма 7)} \\
 (n+1) & \alpha \rightarrow \varphi \rightarrow \forall x.\psi & \text{(М.Р.)}
 \end{array}$$

□

*Примечание.* Доказательство пункта 2 аналогично исходному доказательству для исчисления высказываний.

---

<sup>1</sup> доказательству ИВ

# Лекция 7

## 2 апреля

**Определение.** Будем говорить, что  $\Gamma \models \alpha$ , т.е.  $\alpha$  следует из  $\Gamma$ , если при всех оценках, таких что все  $\gamma \in \Gamma$   $\llbracket \gamma \rrbracket = \text{И}$ , выполнено  $\llbracket \alpha \rrbracket = \text{И}$

*Пример* (странный случай).  $x = 0 \vdash \forall x.x = 0$ , но  $x = 0 \not\vdash \forall x.x = 0$

Условие для корректности: правила для кванторов по свободным переменным из  $\Gamma$  запрещены. Тогда  $\Gamma \vdash \alpha$  влечёт  $\Gamma \models \alpha$  и  $\llbracket \alpha[x := \Theta] \rrbracket = \llbracket \alpha \rrbracket^{x := \llbracket \Theta \rrbracket}$

*Примечание.* Здесь и далее мы предполагаем условие корректности.

### 4.6 Полнота исчисления предикатов

**Определение.**  $\Gamma$  — непротиворечивое, если  $\Gamma \not\vdash \alpha \ \& \ \neg\alpha$  ни при каком  $\alpha$

*Пример.*

- Непротиворечивое:  $\emptyset, A \vee \neg A$
- Противоречивое:  $A \ \& \ \neg A$

Мы будем рассматривать непротиворечивое множество замкнутых бескванторных формул и обозначать  $(\dots)$ .

*Пример.*

- $\{A\}$
- $\{0 = 0\}$

**Определение.** Моделью для  $(\dots)$   $\Gamma$  называется такая модель, что каждая формула из  $\Gamma$  оценивается в И.

**Определение.**  $(\dots)$   $\Gamma$  называется **полным**, если для каждой замкнутой бескванторной формулы  $\alpha$  либо  $\alpha \in \Gamma$ , либо  $\neg\alpha \in \Gamma$ .

Аналогично определяется для не бескванторного множества.

**Теорема 15.** Если  $\Gamma (\dots)$  и  $\alpha$  — замкнутая бескванторная формула, то либо  $\Gamma \cup \{\alpha\}$ , либо  $\Gamma \cup \{\neg\alpha\} — (\dots)$

Аналогичное верно для не бескванторного множества.

*Доказательство.* Пусть и  $\Gamma \cup \{\alpha\}$ , и  $\Gamma \cup \{\neg\alpha\}$  — противоречивы, т.е.:

$$\Gamma, \alpha \vdash \beta \ \& \ \neg\beta \quad \Gamma, \neg\alpha \vdash \beta \ \& \ \neg\beta$$

$$\begin{cases} \Gamma \vdash \alpha \rightarrow \beta \ \& \ \neg\beta \\ \Gamma \vdash \neg\alpha \rightarrow \beta \ \& \ \neg\beta \end{cases} \Rightarrow \Gamma \vdash \beta \ \& \ \neg\beta$$

Т.е.  $\Gamma$  — противоречиво. Это противоречие.  $\square$

**Теорема 16.** Если  $\Gamma — (\dots)$  и в языке счётное количество формул<sup>1</sup>, то можно построить  $\Delta$  — полное  $(\dots)$ , такое что  $\Gamma \subset \Delta$ .

Аналогичное верно для не бескванторного множества.

*Доказательство.* Пусть  $\varphi_1, \varphi_2 \dots$  — замкнутые бескванторные формулы исчисления предикатов.

$$\Gamma_0 := \Gamma$$

$$\Gamma_1 := \Gamma_0 \cup \{\varphi_1\} \text{ или } \Gamma_0 \cup \{\neg\varphi_1\} — \text{смотря что непротиворечиво}$$

$$\Gamma_2 := \Gamma_1 \cup \{\varphi_2\} \text{ или } \Gamma_1 \cup \{\neg\varphi_2\} — \text{смотря что непротиворечиво}$$

$\vdots$

$\Gamma^* := \bigcup_i \Gamma_i$ , тогда  $\Gamma^*$  — полное и непротиворечивое. Первое очевидно, покажем второе.

Пусть  $\Gamma^* \vdash \beta \ \& \ \neg\beta$ . Это конечное доказательство  $\delta_1 \dots \delta_s$  использует конечное число гипотез, пусть они  $\gamma_1 \dots \gamma_k$  и  $\gamma_i \in \Gamma_{R_i}$ . Возьмём  $\Gamma_{\max(R_i)}$ . Тогда  $\Gamma_{\max(R_i)} \vdash \beta \ \& \ \neg\beta$  — противоречие.  $\square$

**Теорема 17.** Любое полное  $(\dots)$   $\Gamma$  имеет модель, т.е. существует оценка  $\llbracket \cdot \rrbracket$ , такая что если  $\gamma \in \Gamma$ , то  $\llbracket \gamma \rrbracket = \text{И}$

*Доказательство.* Пусть  $D$  — все записи из функциональных символов:

$$\llbracket f_0^n \rrbracket^2 \Rightarrow "f_0^n"$$

<sup>1</sup> В исчислении предикатов это верно.

<sup>2</sup> константа

$$\llbracket f_k^n(\theta_1 \dots \theta_k) \rrbracket \Rightarrow "f_k^n(" + \llbracket \theta_1 \rrbracket " + \dots + " + \llbracket \theta_n \rrbracket + ")"$$

$$\text{Предикатные символы: } \llbracket P(\theta_1 \dots \theta_n) \rrbracket = \begin{cases} \text{И,} & P(\theta_1 \dots \theta_n) \in \Gamma \\ \text{Л,} & \text{иначе} \end{cases}$$

Свободных предметных переменных нет, поэтому для них не нужно придумывать оценку.

Так построенная модель — модель для  $\Gamma$ . Докажем это по индукции по количеству связок: любая формула  $\alpha$ , имеющая  $\leq n$  связок, истинно  $\Leftrightarrow \alpha \in \Gamma$ .

База. Очевидно.

Переход. Рассмотрим случай  $\alpha \& \beta$ .

1. Если  $\llbracket \alpha \rrbracket = \text{И}$  и  $\llbracket \beta \rrbracket = \text{И}$ , то  $\alpha \& \beta \in \Gamma$
2. Если  $\llbracket \alpha \rrbracket \neq \text{И}$  или  $\llbracket \beta \rrbracket \neq \text{И}$ , то  $\alpha \& \beta \notin \Gamma$

□

**Определение. Предварённая нормальная форма** — форма, где  $\forall \exists \forall \dots (\tau)$ , где  $\tau$  — формула без кванторов.

**Теорема 18.** Если  $\varphi$  — формула, то существует  $\psi$  в предварённой нормальной форме и при этом  $\varphi \rightarrow \psi$  и  $\psi \rightarrow \varphi$ .

**Теорема 19** (Гёделя о полноте исчисления предикатов). Если  $\Gamma$  — полное непротиворечивое множество замкнутых формул, то оно имеет модель.

*Доказательство.* План таков: рассмотрим  $\Gamma$  — полное непротиворечивое множество замкнутых формул. Построим по нему  $\Gamma^\Delta$  — п.н.м. бескванторных з.ф. Построим по нему по теореме о существовании модели модель  $M^\Delta$  и покажем, что  $M^\Delta$  — модель для  $\Gamma$ :

$$\begin{array}{ccc} \Gamma & & M \\ \text{без кванторов} \downarrow & & \uparrow id \\ \Gamma^\Delta & \xrightarrow{\text{теорема}} & M^\Delta \end{array}$$

Рассмотрим  $\Gamma_0 \subset \Gamma_1 \dots \Gamma_i \dots \subset \Gamma^*$  и  $\Gamma^* = \bigcup_i \Gamma_i$ , а также  $\Gamma_0 = \Gamma$ , где все формулы в предварённой нормальной форме. Определим переход  $\Gamma_i \rightarrow \Gamma_{i+1}$ .

Построим семейство функциональных символов  $d_j^i$ , которые нигде ранее не использовались.

Рассмотрим случаи того, чем является  $\varphi_j \in \Gamma_i$ .

1.  $\varphi_j$  без кванторов — не трогаем.

2.  $\varphi_j \equiv \forall x.\psi$  — добавим все формулы вида  $\psi[x := \theta]$ , где  $\theta$  — терм, составленный из  $f, d_0^l, d_1^{l'}, \dots, d_{i-1}^{l' \dots'}$

3.  $\varphi_j \equiv \exists x.\psi$  — добавим формулу  $\psi[x := d_i^j]$

Таким образом, мы получим  $\Gamma_{i+1} = \Gamma_i \cup \{\text{все добавленные формулы}\}$ .  $\square$

*Следствие 19.1.* Пусть  $\models \alpha$  и  $\alpha$  замкнута, тогда  $\vdash \alpha$ .

*Доказательство.* Пусть  $\models \alpha$ , но не  $\not\models \alpha$ . Значит,  $\{\neg\alpha\}$  — непротиворечивое множество замкнутых формул.

Почему непротиворечиво?  $\neg\alpha \vdash \beta \ \& \ \neg\beta, \beta \ \& \ \neg\beta \vdash \alpha$ , следовательно  $\neg\alpha \vdash \alpha$ , но ещё и  $\alpha \vdash \alpha$ . Таким образом,  $\vdash \alpha$ .

Значит, у  $\neg\alpha$  есть модель  $M$ ,  $\llbracket \neg\alpha \rrbracket_M = \text{И}$ . Значит,  $\not\models \alpha$   $\square$

**Теорема 20.** Если  $\Gamma_i$  непротиворечиво, то  $\Gamma_{i+1}$  непротиворечиво.

**Теорема 21.**  $\Gamma^*$  непротиворечиво.

$\Gamma^\Delta = \Gamma^*$  без формул с  $\forall, \exists$

# Лекция 8

## 9 апреля

### 4.7 Теорема Гёделя о полноте исчисления предикатов

**Теорема 22.** Если  $\varphi$  — замкнутая<sup>1</sup> формула исчисления предикатов, то найдётся  $\psi$  — замкнутая формула исчисления предикатов, такая что  $\vdash \varphi \rightarrow \psi$  и  $\psi \rightarrow \varphi$ , при этом  $\psi$  с поверхностными кванторами.

*Доказательство.* В домашних заданиях. □

Рассмотрим  $\Gamma$  — непротиворечивое множество замкнутых формул. Рассмотрим  $\Gamma'$  — полное расширение  $\Gamma$ . Пусть  $\varphi$  — формула из  $\Gamma'$ , тогда найдётся  $\psi \in \Gamma'$ , что  $\psi$  — с поверхностными кванторами и  $\vdash \varphi \rightarrow \psi, \vdash \psi \rightarrow \varphi$ .

Рассмотрим новое множество констант  $d_j^i$ . Построим семейство  $\{\Gamma_j\}$ :  $\Gamma' = \Gamma_0 \subset \Gamma_1 \subset \Gamma_2 \subset \dots \subset \Gamma_j \subset \dots$

Опишем переход  $\Gamma_j \Rightarrow \Gamma_{j+1}$ .

Рассмотрим все формулы из  $\Gamma_j$ :  $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots\}$ .

1.  $\gamma_i$  — формула без кванторов — оставим как есть.
2.  $\gamma_i \equiv \forall x.\varphi$  — добавим в  $\Gamma_{j+1}$  все формулы вида  $\varphi[x := \theta]$ , где  $\theta$  составлен из всех функциональных символов исчисления предикатов и констант вида  $d_1^k \dots d_j^k$ .
3.  $\gamma_i \equiv \exists x.\varphi$  — добавим  $\varphi[x := d_{j+1}^i]$

**Утверждение.**  $\Gamma_{i+1}$  непротиворечиво, если  $\Gamma_i$  непротиворечиво.

*Доказательство.* От противного. Пусть  $\Gamma_{i+1} \vdash \beta \ \& \ \neg\beta$

$\Gamma_i, \gamma_1 \dots \gamma_n \vdash \beta \ \& \ \neg\beta, \gamma_i \in \Gamma_{i+1} \setminus \Gamma_i$

---

<sup>1</sup> Слово “замкнутая” не нужно, но мне нравится — Д.Г.



$$\Gamma_i \vdash \gamma_1 \rightarrow \gamma_2 \rightarrow \dots \rightarrow \gamma_n \rightarrow \beta \ \& \ \neg\beta$$

Докажем, что  $\Gamma_i \vdash \beta \ \& \ \neg\beta$  по индукции.  $\Gamma_i \vdash \gamma \rightarrow \varepsilon^2$ , т.е.  $\gamma$  получен из  $\forall x.\xi \in \Gamma_i$  или  $\exists x.\xi \in \Gamma_i$

Покажем, что  $\Gamma_i \vdash \varepsilon$ .

Рассмотрим случай  $\forall x.\xi$ . Заметим, что  $\Gamma_i \vdash \forall x.\xi$ , т.к.  $\forall x.\xi \in \Gamma_i$ . По индукционному предположению  $\Gamma_i \vdash \gamma \rightarrow \varepsilon$ .  $\Gamma_i \vdash (\forall x.\xi) \rightarrow \underbrace{(\xi[x := \theta])}_{\substack{\gamma \text{ по} \\ \text{построению } \Gamma_{i+1}}}$  — по аксиоме 11. Очевидно, что

$(\forall x.\xi) \rightarrow \varepsilon$  и у нас есть гипотеза  $\forall x.\xi$ , поэтому по М.Р.  $\varepsilon$ .

В случае  $\exists x.\xi$  аналогично доказать не получится. Поэтому мы будем делать странное, без этого в теореме Гёделя никак<sup>3</sup>.

Рассмотрим  $\Gamma_i \vdash \underbrace{\xi[x := d_{i+1}^k]}_{\gamma} \rightarrow \varepsilon$ . Заметим, что  $d_{i+1}^k$  не входит в  $\varepsilon$ . Заменим все  $d_{i+1}^k$  в

доказательстве на  $y$  — новую переменную. Это будет доказательством  $\Gamma \vdash \xi[x := y] \rightarrow \varepsilon$ . Тогда  $\exists y.\xi[x := y] \rightarrow \varepsilon^4$ . По ДЗ можно заметить, что  $(\exists x.\xi x) \rightarrow (\exists y.\xi[x := y])$  и по лемме  $(\exists x.\xi) \rightarrow \varepsilon$  и у нас есть гипотеза  $\exists x.\xi$ , поэтому по М.Р.  $\varepsilon$ .

Таким образом,  $\Gamma_i \vdash \beta \ \& \ \neg\beta$  — противоречие.  $\square$

$$\Gamma^* := \bigcup_i \Gamma_i$$

*Утверждение.*  $\Gamma^*$  непротиворечиво.

*Доказательство.* Предположим обратное:  $\Gamma_0 \vdash \gamma_1 \rightarrow \dots \rightarrow \gamma_n \rightarrow \beta \ \& \ \neg\beta$ , где  $\gamma_i \in \Gamma_i$ .

$\Gamma_{\max_i} \vdash \beta \ \& \ \neg\beta$ , значит  $\Gamma_{\max}$  противоречиво — противоречие.  $\square$

Пусть  $\Gamma^\Delta$  —  $\Gamma^*$  без кванторов. По утверждению у  $\Gamma^\Delta$  есть модель  $M$ .

*Утверждение.* Если  $\gamma \in \Gamma'$ , то  $\llbracket \gamma \rrbracket_M = \text{И}$ .

*Доказательство.* Докажем по индукции; база очевидна.

Переход — рассмотрим два случая:

$$1. \ \gamma \equiv \forall x.\delta$$

<sup>2</sup> что-то

<sup>3</sup> Это цитата.

<sup>4</sup> Правило можно применять, т.к.  $y$  не входит в правую часть.

$\llbracket \forall x. \delta \rrbracket = \text{И}$ , если  $\llbracket \delta \rrbracket^{x:=k} = \text{И}$ ,  $k \in D$ <sup>5</sup>. Рассмотрим  $\llbracket \delta \rrbracket^{x:=k}$ ,  $k \in D$ .  $k$  осмысленно в некотором  $\Gamma_p$ .  $\delta$  добавлено на шаге  $q$ . Рассмотрим шаг  $\Gamma_{\max(p,q)}$ . В шаге  $\Gamma_{\max(p,q)+1}$  добавлено  $\delta[x := k]$ .  $\delta[x := k]$  меньше на один квантор, чем  $\gamma$ , и соответственно  $\llbracket \delta[x := k] \rrbracket = \text{И}$ .

2.  $\gamma \equiv \exists x. \delta$  — аналогично.

□

## 4.8 Неразрешимость исчисления предикатов

**Теорема 23.** Исчисление предикатов неразрешимо.

**Определение.** Язык — множество слов.

**Определение.** Язык  $\mathcal{L}$  разрешим, если существует алгоритм  $A$  такой, что по слову  $w$   $A(w)$  останавливается в “1”, если  $w \in \mathcal{L}$

**Проблема останова:** не существует алгоритма, который по программе машины Тьюринга ответит, остановится она или нет. Альтернативная формулировка: пусть  $\mathcal{L}'$  — язык всех останавливающихся программ для машин Тьюринга.  $\mathcal{L}'$  неразрешим.

*Доказательство.* Вспомним операцию конкатенации элементов cons.

Пусть  $A$  — алфавит ленты<sup>6</sup>. Создадим два набора функциональных нульместных символов:  $S_x$ ,  $x \in A$  и  $e$  — nil. Также создадим  $c(a, b)$  — двухместный функциональный символ, которому соответствует cons.

Пусть  $S$  — множество состояний, тогда  $b_s$ , если  $s \in S$  — функциональный символ для состояния.  $b_0$  — начальное состояние,  $b_\Delta$  — допускающее.

Создадим предикат  $R(\alpha, w, b_s)$ , гласящий, придет ли машина Тьюринга в состояние  $b_s$ , при этом слева от головки (*и под ней*) строка  $\alpha$ , справа строка  $w$ . В частности,  $R(\alpha, e, b_0)$  истинно, т.к. это начальное состояние при запуске на строке  $\alpha$ .

Машина Тьюринга совершает переходы вида  $(s_x, b_s) \rightarrow (s_y b_t, a)$ , где  $a$  — одно из действий “передвинуться влево”, “перевдвинуться вправо”, “не двигаться”.  $x$  — буква на ленте,  $s$  — текущее состояние. То же самое, но в терминах предиката :

1. Не двигаться:

$$\forall z. \forall w. R(c(s_x, z), w, b_s) \rightarrow R(c(s_x, z), w, b_t)$$

2. Передвинуться влево:

$$\forall z. \forall w. R(c(s_x, z), w, b_s) \rightarrow R(z, c(s_y, w), b_t)$$

<sup>5</sup> все записи из функциональных символов

<sup>6</sup> машины Тьюринга

3. Передвинуться вправо:

$$\forall z. \forall w. R(z, (s_y, w), b_s) \rightarrow R(c(s_y, z), w, b_t)$$

Мы опустили некоторые технические шаги — описать начальное и завершающее состояния.

Взяв & по всем формулам, мы получим некоторую формулу  $\varphi$ . Эта формула описывает машину Тьюринга и из неё выводится завершающее состояние:  $\varphi \rightarrow \exists z. \exists w. R(z, w, b_\Delta)$ . Таким образом, разрешимость этой формулы эквивалентна разрешимости машины Тьюринга.  $\square$

# Лекция 9

## 16 апреля

### 5 Теория первого порядка

Это исчисление предикатов + нелогические функциональные предикатные символы + нелогические (*математические*) аксиомы.

- Теория нулевого порядка — без кванторов
- Теория первого порядка — кванторы по предметным переменным
- Теория второго порядка — кванторы по предикатам
- Теория третьего порядка — кванторы по предикатам от предикатов

И так далее. Чем больше порядок, тем о большем количестве вещей мы можем судить. Теория нулевого порядка описывает объекты, первого — множества, второго — множества множеств и т.д.

Теория первого порядка нам нужна, чтобы зафиксировать некоторый набор аксиом. Можно их всегда писать перед “ $\vdash$ ”, но мы не хотим. В какой-то степени это похоже на программы, где мы используем стандартную библиотеку *ИП* и навешиваем свои функции.

#### 5.1 Аксиоматика Пеано

Это первая<sup>1</sup> попытка формализации чисел. Будем говорить, что  $N$  соответствует аксиоматике Пеано, если:

1. Задана  $(') : N \rightarrow N$  — инъективная функция.
2. Задан  $0 \in N$  : нет такого  $a \in N$ , что  $a' = 0$

---

<sup>1</sup> рукомахательная

3. Если  $P(x)$  — некоторое утверждение, зависящее от  $x \in N$ , такое, что  $P(0)$  и всегда, когда  $P(x)$ , также и  $P(x')$ , тогда  $P(x)$ . Это свойство индукции.

*Примечание.* Мы неявно зависим от множества вещей — что такое равенство, что такое утверждение и т.д.

*Утверждение.* 0 единственный.

*Доказательство.* Пусть 0 и  $n$  нули. Тогда нет  $x : x' = 0$  и  $x' = n$ . Рассмотрим утверждение  $P(x) = x = 0$ , либо существует  $t : t' = x$ . Рассмотрим случаи:

1.  $P(0) : 0 = 0$  — ок.
2. Пусть  $P(x)$  выполнено, докажем  $P(x')$ . Заметим, что  $t = x$ .

Таким образом,  $P(x)$  при всех  $x \in N$ . □

**Определение.**

$$a + b = \begin{cases} a, & b = 0 \\ (a + c)', & b = c' \end{cases}$$

*Пример.*

$$2 + 2 = 0'' + 0'' = (0'' + 0')' = ((0'' + 0)')' = ((0'')')' = 0''' = 4$$

**Определение.**

$$a \cdot b = \begin{cases} 0, & b = 0 \\ (a \cdot c) + a, & b = c' \end{cases}$$

$$a^b = \begin{cases} 1, & b = 0 \\ (a^c) \cdot a, & b = c' \end{cases}$$

*Утверждение.*  $a + 0 = 0 + a$

*Доказательство.* Пусть  $P(a) \equiv a + 0 = 0 + a$ .

База:  $P(0) = 0 + 0 = 0 + 0$

Переход:  $P(x) \rightarrow P(x')$

$$0 + x' \stackrel{\text{опр.}}{=} (0 + x)' \stackrel{\text{инд. предп.}}{=} (x + 0)' \stackrel{\text{инд. предп.}}{=} x' + 0$$

□

*Утверждение.*  $a + b' = a' + b$

*Доказательство.* При  $b = 0$ :

$$a' + 0 = a' = (a + 0)' = a + 0'$$

При  $b = c'$  есть  $a + c' = a' + c$ . Докажем  $a + c'' = a' + c'$

$$(a + c')' = (a' + c)' = a' + c$$

□

*Утверждение.*  $a + b = b + a$

*Доказательство.* База:  $b = 0$  — утверждение 5.1

Переход:  $a + c'' = c + a$ , если  $a + c' = c' + a$

$$a + c'' \stackrel{\text{опр.}}{=} (a + c')' \stackrel{\text{инд. предп.}}{=} (c' + a)' \stackrel{\text{опр.}}{=} c' + a'$$

□

## 5.2 Формальная арифметика

Рассмотрим следующую теорию первого порядка: исчисление предикатов, в которое добавили следующие символы:

- 0-местный функциональный символ  $0$
- 1-местный функциональный символ  $'$
- 2-местные функциональные символы  $(\cdot), (+)$
- 2-местный предикатный символ  $(=)$

И добавили следующие 8 аксиом:

1.  $a = b \rightarrow a' = b'$
2.  $a = b \rightarrow a = c \rightarrow b = c$
3.  $a' = b' \rightarrow a = b$
4.  $\neg a' = 0$
5.  $a + b' = (a + b)'$
6.  $a + 0 = a$
7.  $a \cdot 0 = 0$
8.  $a \cdot b' = a \cdot b + a$

9. Схема аксом индукции:

$$(\psi[x := 0]) \ \& \ (\forall x. \psi \rightarrow (\psi[x := x'])) \rightarrow \psi$$

Если  $x$  входит свободно в  $\psi$

**Определение.**  $\exists!x.\varphi(x) \equiv (\exists x.\varphi(x)) \ \& \ \forall p.\forall q.\varphi(p) \ \& \ \varphi(q) \rightarrow p = q$

**Определение.**  $a \leq b$  – сокращение для  $\exists n.a + n = b$

**Определение.**

$$0^{(n)} = \begin{cases} 0, & n = 0 \\ 0^{(n-1)'}, & n > 0 \end{cases}$$

$$\bar{n} = 0^{(n)}$$

**Определение.** Пусть  $W \subset \mathbb{N}_0^n$ .  $W$  – **выразимое в формальной арифметике отношение, если:** (пусть  $k_1 \dots k_n \in \mathbb{N}$ )

1.  $(k_1 \dots k_n) \in W$ , тогда  $\vdash w[x_1 := \bar{k}_1 \dots x_n := \bar{k}_n]$
2.  $(k_1 \dots k_n) \notin W$ , тогда  $\vdash \neg w[x_1 := \bar{k}_1 \dots x_n := \bar{k}_n]$

**Определение.**  $f : \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$  **представима в формальной арифметике**, если найдётся  $\varphi$  – формула с  $n + 1$  свободной переменной  $k_1 \dots k_{n+1} \in \mathbb{N}$

1.  $f(k_1 \dots k_n) = k_{n+1}$ , то  $\vdash \varphi(\bar{k}_1 \dots \bar{k}_{n+1})$
2.  $\vdash \exists!x.\varphi(k_1 \dots k_n, x)$

# Лекция 10

## 30 апреля

### 6 Арифметизация математики

Это идея того, все содержательное в математике может быть выражено как арифметика. Мы к ней подойдём издалека

#### 6.1 Рекурсивные функции

Рассмотрим следующие примитивы, чтобы определить рекурсивные функции:

1.  $Z : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} : Z(x) = 0$
2.  $N : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} : N(x) = x + 1$
3.  $S_k : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  — подстановка

$$S_k \langle g, f_1 \dots f_k \rangle (x_1 \dots x_m) = g(f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}) \dots f_k(\bar{x}))$$

, где  $\bar{x} \equiv x_1 \dots x_m$  и если  $f_1 \dots f_k : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  и  $g : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$

4.  $P_k^l : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N} : P_k^l(x_1 \dots x_k) = x_l$  при  $l \leq k$  — проекция
5.  $R \langle f, g \rangle : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$ , если  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}, g : \mathbb{N}^{m+2} \rightarrow \mathbb{N}$

$$R \langle f, g \rangle (y, x_1 \dots x_m) = \begin{cases} f(x_1 \dots x_m), & y = 0 \\ g(y - 1, R \langle f, g \rangle (y - 1, x_1 \dots x_m), x_1 \dots x_m), & y > 0 \end{cases}$$

$R$  называется **примитивной рекурсией**.

$R$  можно воспринимать как цикл `for` с переменной цикла  $y$ .

*Пример.*



$$(a) R \langle f, g \rangle x = f(x)$$

$$(b) R \langle f, g \rangle x = g(0, f(x), x)$$

$$(c) R \langle f, g \rangle x = g(1, g(0, f(x), x), x)$$

**Определение.**  $f : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  — **примитивно-рекурсивная**, если найдётся выражение  $f$  через примитивы  $Z, N, S, P, R$ .

*Пример.*

$$1. 1(x) = 1$$

$$1 = S \langle N, Z \rangle$$

$$2. (+2)(x) = x + 2$$

$$(+2) = S \langle N, N \rangle$$

$$S \langle N, N \rangle (x) = g(f(x)) = N(N(x)) = x + 2$$

$$3.$$

$$(+3) = S \langle N, S \langle N, N \rangle \rangle$$

$$4. (\times 2)$$

Промежуточная функция:

$$(\times 2_a) = R \langle P_1^1, S \langle N, P_3^2 \rangle \rangle$$

$$(\times 2) = S \langle (\times 2_a), P_1^1, P_1^1 \rangle$$

Добавим новый примитив “минимизация”:

$$6. M \langle f \rangle : \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N} \text{ при } f : \mathbb{N}^{m+1} \rightarrow \mathbb{N}$$

$M \langle f \rangle (x_1 \dots x_m) = y$  — минимальный  $y$  такой, что  $f(y, x_1 \dots x_m) = 0$ . Если  $f(y, x_1 \dots x_m) > 0$  при всех  $y$ , результат неопределён.

**Теорема 24.**  $(+), (\cdot), (x^y), (:), (\sqrt{\cdot})$ , деление с остатком, числа Фибоначчи — примитивно-рекурсивные функции.

Пусть  $p_1, p_2 \dots$  — простые числа.

*Утверждение.*  $p(i) : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}, p(i) = p_i$  — примитивно-рекурсивная функция.

$2^{k_1} \cdot 3^{k_2} \cdot 5^{k_3} \cdot \dots \cdot p_i^{k_i}$  — примитивно-рекурсивно

$$\text{plog}_n k = \max t : k \equiv 0 \pmod{n^t}$$

*Пример.*

$$1. \text{plog}_5 120 = 1$$

$$2. \text{plog}_2 120 = 3$$

$\text{plog}_k p$  — примитивно-рекурсивная функция.

Тогда мы можем кодировать  $\langle k_1 \dots k_n \rangle$  как  $2^{k_1} \cdot 3^{k_2} \cdot 5^{k_3} \cdot \dots \cdot p_i^{k_i}$  и перевод в любую сторону примитивно-рекурсивен. С помощью такого подхода проще создавать примитивно-рекурсивные функции.

**Определение** (Функция Аккермана).

$$A(m, n) = \begin{cases} n + 1, & m = 0 \\ A(m - 1, 1), & m > 0, n = 0 \\ A(m - 1, A(m, n - 1)), & m > 0, n > 0 \end{cases}$$

*Утверждение.*  $A(m, n)$  не примитивно-рекурсивно.

*Доказательство.* Общая идея: если некоторый текст длины  $n$  задал число  $k$ , то добавление одного символа не позволяет получить число больше, чем  $k^k$ , т.к.  $R$  не может совершить больше  $R$  итераций.  $\square$

**Теорема 25.**  $f$  — рекурсивная функция. Тогда  $f$  представима в формальной арифметике.

**Теорема 26.**  $f$  представима в формальной арифметике. Тогда  $f$  рекурсивна.

*Доказательство.* Пусть  $\vdash \varphi$  и  $\delta_1 \dots \delta_n \equiv \varphi$  — доказательство  $\varphi$  в формальной арифметике.

Пусть  $C$  — рекурсивная функция, проверяющая доказательство в формальной арифметике, т.е.  $C(p, x) = \begin{cases} 0, & \text{доказательство корректно} \\ \neq 0, & \text{доказательство некорректно} \end{cases}$ , где  $x$  — запись доказательства формулы  $p$ .

По теореме 25 получим формулу  $\sigma$ , для которой верно  $\vdash \sigma(p, x, 0)$ , если  $p$  — доказательство формулы  $x$ .  $\square$

## 6.2 Проблема останова

Пусть есть программа  $P(p, x) = \begin{cases} 0, & \text{если } p(x) \text{ останавливается} \\ 1, & \text{если } p(x) \text{ не останавливается} \end{cases}$

Рассмотрим программу  $Q$ :

```

Q(p)
  if P(p) = 1
    return 0
  else
    while true do;

```

Чему равно  $Q(Q)$ ? Ни 0, ни 1. Это противоречие.

Мы аналогичным образом сломаем наше доказательство — создадим формулу “для меня нет доказательства”.

**Теорема 25.A.** Примитивы  $Z, N, S, P$  представимы в формальной арифметике.

*Доказательство.*

1.  $Z : \xi := x_1 = x_1 \ \& \ x_2 = 0$
2.  $N : \nu := x_2 = x'_1$
3.  $P_k^l : \pi_k^l := x_1 = x_1 \ \& \ x_2 = x_2 \ \& \ \dots \ \& \ x_l = x_{k+1} \ \& \ \dots \ \& \ x_k = x_k$
4.  $S \langle g, f_1 \dots f_k \rangle : g \leftrightarrow \gamma, f_i \leftrightarrow \varphi_i.$

$$\exists r_1. \exists r_2. \dots \exists r_k. \varphi_1(x_1 \dots x_m, r_1) \ \& \ \varphi_2(x_1 \dots x_m, r_2) \ \& \ \dots \ \& \ \varphi_k(x_1 \dots x_m, r_k) \ \& \ \gamma(r_1 \dots r_k, x_{m+1})$$

6.  $M \langle f \rangle$

$$\varphi(x_{m+1}, x_1 \dots x_m, \bar{0}) \ \& \ \forall y. y < x_{m+1} \rightarrow \neg \varphi(y, x_1 \dots x_m, \bar{0})$$

5.  $\beta$ -функция Гёделя:

$$\beta(b, c, i) = b \% (1 + c \cdot (i + 1))$$

**Теорема 25.B.**  $a_0 \dots a_n$  — некоторые значения  $\in \mathbb{N}$ . Тогда найдутся  $b$  с такие, что  $\beta(b, c, i) = a_i$

*Доказательство.*

*Утверждение.* Если  $i \neq j$ , то  $1 + c(i + 1)$  взаимно просто с  $1 + c(j + 1)$ .

*Доказательство.*  $c := \max(a_0 \dots a_n, n)!$ .

Пусть есть некоторый простой  $p$ :  $1 + c(i + 1) \equiv 0 \pmod p$  и  $1 + c(j + 1) \equiv 0 \pmod p$ . Тогда  $c(i + 1 - j - 1) \equiv 0 \pmod p$  и  $c(i - j) \equiv 0 \pmod p$  — противоречие.  $\square$

*Утверждение.* По китайской теореме об остатках найдётся  $b$  с нужными свойствами.

$\square$

$\beta$  примитивно-рекурсивна и представима в формальной арифметике:

$$B(b, c, i, q) = (\exists p. b = p \cdot (1 + c \cdot (1 + i)) + q) \ \& \ q < b$$

Тогда для  $R \langle f, g \rangle$ , если  $f \leftrightarrow \varphi, g \leftrightarrow \gamma$ :

$$\begin{aligned} \exists b. \exists c. \exists f. \varphi(x_1 \dots x_n, f) \ \& \ B(b, c, \bar{0}, f) \ \& \ \forall y. y < x_{n+1} \rightarrow \exists r_{y-1}. B(b, c, y-1, r_{y-1}) \\ \ \& \ \exists r_{y+1}. B(b, c, y+1, r_{y+1}) \ \& \ \varphi(y, r_y, x_1 \dots x_n, r_{y+1}) \\ \ \& \ B(b, c, x_{n+1}, x_{n+2}) \end{aligned}$$

□

# Лекция 11

## 7 мая

### 7 Гёделева нумерация

Это кодировка для строк.

**Определение** ( $\ulcorner \urcorner$ ).

$x$	$\ulcorner x \urcorner$
(	3
)	5
,	7
&	9
$\vee$	11
$\neg$	13
$\rightarrow$	15
$\forall$	17
$\exists$	19
.	21
$f_n^k$	$23 + 6 \cdot 2^n \cdot 3^k$
$P_n^k$	$25 + 6 \cdot 2^n \cdot 3^k$
$x_k$	$27 + 6 \cdot 2^k$

*Пример.* Для формальной арифметики:  $(=) = P_0^2$ ,  $(0) = f_0^0$ ,  $(') = f_0^1$ ,  $(+) = f_0^2$ ,  $(\cdot) = f_1^2$

**Определение.**  $\ulcorner a_0 a_1 \dots a_{n-1} \urcorner = 2^{\ulcorner a_0 \urcorner} \cdot 3^{\ulcorner a_1 \urcorner} \dots p_n^{\ulcorner a_{n-1} \urcorner}$ , где  $p_i$  —  $i$ -тое простое число.

**Определение.**  $\ulcorner S_0 \dots S_n \urcorner = 2^{\ulcorner S_0 \urcorner} \dots p_n^{\ulcorner S_{n-1} \urcorner}$ , где  $S_i$  — некоторая строка.

Несложно заметить, что символы всегда нечетные, а строки всегда чётные, что упрощает жизнь. Это не содержательно и сделано только для удобства вычисления “руками”, т.к. это было сделано до компьютеров.

Таким образом, мы можем взять любую формулу или доказательство и закодировать.

*Пример.*  $\ulcorner a = 0 \urcorner = 2^{27+6} \cdot 3^{25+6 \cdot 4} \cdot 5^{23+6}$

**Теорема 27.** Рассмотрим функцию

$$Proof(\underbrace{x}_{\ulcorner \chi \urcorner}, p) = \begin{cases} 0, & \text{если } p \text{ — гёделев номер доказательства } \chi \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}$$

*Proof* рекурсивна.

**Теорема 28.** Если функция представима в формальной арифметике, то она рекурсивна.

*Доказательство.* Рассмотрим  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , представимую в формальной арифметике. Тогда существует  $\varphi$  с  $n + 1$  свободной переменной  $(x_1 \dots x_{n+1})$ <sup>1</sup>.

Если  $f(k_1 \dots k_n) = k_{n+1}$ , то  $\vdash \varphi(\overline{k_1} \dots \overline{k_{n+1}})$ , т.е. существует доказательство  $\delta = \delta_1 \dots \delta_t$ .

$$Proof(\ulcorner \varphi(\overline{k_1} \dots \overline{k_{n+1}}) \urcorner, \ulcorner \delta \urcorner) = 0$$

Найдём  $\delta$  и  $\overline{k_{n+1}}$ . Переберем  $y$  и будем подставлять  $\text{plog}_2 y$  вместо  $\overline{k_{n+1}}$  и  $\text{plog}_3 y$  вместо  $\delta$ . Таким образом, мы переберем все возможные комбинации:

$$S \langle \text{plog}_2, M \langle S \langle Proof, S \langle Subst_{n+1}, \ulcorner \varphi \urcorner, P_{n+1}^2, P_{n+1}^3 \dots P_{n+1}^{n+1}, S \langle \text{plog}_2, P_{n+1}^1 \rangle \rangle, S \langle \text{plog}_3, P_{n+1}^1 \rangle \rangle \rangle \rangle$$

- $S \langle \text{plog}_2, P_{n+2}^1 \rangle$  — то же самое, что и  $\text{plog}_2 y$ .
- $Subst_i$  берёт  $i$ -тый аргумент  $x_i$  и заменяет все вхождения  $x_i$  в во всех аргументах, кроме последнего, на значение последнего аргумента.

Объяснение:  $M$  найдёт минимальное<sup>2</sup>  $y$ , такое что при вышеуказанной подстановке  $Proof = 0$ . Т.к. нам нужно получить  $k_{n+1}$ , то мы берём  $\text{plog}_2$ .  $\square$

## 7.1 Самоприменение

**Определение.**  $W_1(\ulcorner \chi \urcorner, \ulcorner p \urcorner) = 0$  тогда и только тогда, когда  $p$  — доказательство самоприменения  $\chi$ , т.е. доказательство  $\chi[x_0 := \ulcorner \chi \urcorner]$ ; иначе  $W_1 = 1$ .

<sup>1</sup> и т.д., см. определение представимой в формальной арифметике функции

<sup>2</sup> что нам не нужно, но пусть будет

Представление  $W_1$  в формальной арифметике через  $Subst$  очевидно, обозначим его  $\omega_1$ .

Формула  $\sigma(x) = \forall p. \neg \omega_1(x, p)$  утверждает “самоприменение  $x$  недоказуемо”. Доказуемо ли  $\sigma(\overline{\sigma})$ ?

*Примечание.* Эта тема несколько архаична.

**Определение.** Теория  $\omega$ -непротиворечива, если для любой  $\varphi(x)$ : если  $\vdash \varphi(\bar{0}), \vdash \varphi(\bar{1}) \dots$ , то  $\nvdash \exists x. \neg \varphi(x)$

**Теорема 29.** Если теория  $\omega$ -непротиворечива, то она непротиворечива.

*Доказательство.* Рассмотрим  $\varphi(x) := x = x$ . Т.к.  $\vdash \bar{0} = \bar{0}, \vdash \bar{1} = \bar{1} \dots$ , то по  $\omega$ -непротиворечивости  $\nvdash \exists x. \neg(x = x)$ .  $\square$

**Теорема 30** (Гёделя о неполноте арифметики №1).

1. Если формальная арифметика непротиворечива, то  $\nvdash \sigma(\overline{\sigma})$
2. Если формальная арифметика  $\omega$ -непротиворечива, то  $\nvdash \neg \sigma(\overline{\sigma})$

*Доказательство.*

1. Пусть  $\vdash \sigma(\overline{\sigma})$ , т.е. существует  $p$  — гёделев номер доказательства  $\vdash \sigma(\overline{\sigma})$ . Тогда  $\vdash \forall p. \neg \omega_1(\overline{\sigma}, p)$ . С другой стороны,  $W_1(\overline{\sigma}, p) = 0$ , т.е.  $\vdash \omega_1(\overline{\sigma}, \bar{p})$  — противоречие.
2. Пусть  $\vdash \neg \sigma(\overline{\sigma})$ . Тогда  $\vdash \exists p. \omega_1(\overline{\sigma}, p)$ , но при этом  $\vdash \neg \omega_1(\overline{\sigma}, \bar{0})$  и то же самое для любого числа, т.к. иначе  $\vdash \sigma(\overline{\sigma})$  и получается противоречие.

Но по  $\omega$ -непротиворечивости  $\vdash \sigma(\overline{\sigma})$  — противоречие.

$\square$

*Следствие 30.1.* Формальная арифметика со стандартной интерпретацией неполна.

*Доказательство.* По определению  $\vdash \omega_1(x, p)$  тогда и только тогда, когда  $p$  — доказательство  $x(x)$ . Ясно, что  $\nvdash \omega_1(\overline{\sigma}, p)$  для любого  $p$ . Тогда  $\llbracket \omega_1(\overline{\sigma}, p) \rrbracket = \text{Л}$ , следовательно  $\llbracket \forall p. \neg \omega_1(\overline{\sigma}, p) \rrbracket = \text{И}$ . Но  $\nvdash \sigma(\overline{\sigma})$  — противоречие.  $\square$

Есть формулировка этой теоремы без  $\omega$ -непротиворечивости.

**Теорема 31** (Гёделя о неполноте арифметики №1 в форме Россера).

$$W_2(x, p) = \begin{cases} 0, & p \text{ — доказательство } \neg x(\overline{x}) \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$\rho(x) = \forall p. \omega_1(x, p) \rightarrow \exists q. q < p \ \& \ \omega_2(x, q)$$

То есть  $\rho$  гласит, что если мы найдём доказательство самоприменения  $x$ , то мы найдём доказательство отрицания самоприменения  $x$ , при этом данное доказательство будет иметь меньший номер.

1. Если формальная арифметика непротиворечива, то  $\not\vdash \rho(\overline{\rho})$
2. Если формальная арифметика непротиворечива, то  $\not\vdash \neg\rho(\overline{\rho})$

*Примечание.* Эта теорема формализована на Coq в 18 тысяч строк.

**Определение.**  $Consis \equiv \forall p. \neg\pi(\overline{1 = 0}, p)$ , где  $\pi$  есть арифметизированное *Proof*. Неформально *Consis* эквивалентно тому, что арифметика непротиворечива.

**Теорема 32** (Гёделя о неполноте арифметики №2).  $\vdash Consis \rightarrow \sigma(\overline{\sigma})$

*Примечание.* Теорема гласит, что если доказать *Consis*, то докажется  $\sigma(\overline{\sigma})$ , из чего следует противоречивость формальной арифметики. Следовательно, внутри Ф.А. доказать непротиворечивость Ф.А. невозможно.

*Доказательство.* Полного доказательства не будет, оно убийственное<sup>3</sup>.

Если вдуматься, то доказывать нечего, т.к. теорема гласит, что если формальная арифметика непротиворечива, то не существует доказательства самоприменения  $\sigma$ , т.е.  $\forall p. \neg\omega_1(\overline{\sigma}, p)$ . Таким образом, это просто первый пункт теоремы [Гёделя о неполноте арифметики №1](#), но формализованный.  $\square$

---

<sup>3</sup> Это цитата.



# Лекция 12

14 мая

## 8 Теория множеств

*Примечание.* Обычно фокус в курсе матлогики делается именно на теории множеств, т.к. она более полезна для математики.

**Определение. Теория множеств** — теория первого порядка с нелогическим предикатом “принадлежность” ( $\in$ ) и нижеуказанными схемами аксиом.

**Определение.**  $a \subseteq b$ , если  $\forall x. x \in a \rightarrow x \in b$

*Примечание.* Моделью для теории множеств является конструкция в стиле алгебры Линденбаума.

**Определение** (пара).

$$\begin{aligned}\langle a, b \rangle &= \{\{a\}, \{a, b\}\} \\fst \langle a, b \rangle &= \bigcup \left( \bigcap \langle a, b \rangle \right) \\snd \langle a, b \rangle &= \bigcup \left( \bigcup \langle a, b \rangle \setminus \bigcap \langle a, b \rangle \right)\end{aligned}$$

**Определение.**  $R \subseteq X^2$  — бинарное отношение на  $X$ .

Что такое равенство?

- Принцип Лейбница (*неразличимость*):  $A = B$ , если для любого “предиката”<sup>1</sup>  $P$  выполнено  $P(A) \leftrightarrow P(B)$
- Принцип объёмности:  $A$  и  $B$  состоит из одинаковых элементов.

Сокращение:  $a \leftrightarrow b$ , если  $(a \rightarrow b) \ \& \ (b \rightarrow a)$

---

<sup>1</sup> Множество  $\{x \mid P(x)\}$

**Определение.**  $a = b$ , если  $a \subseteq b$  &  $b \subseteq a$

*Примечание.* То есть мы используем принцип объемности. Из него следует принцип Лейбница.

**Аксиома 1** (равенства). Равные множества содержатся в одних и тех же множествах.

$$\forall abc. a = b \ \& \ a \in c \rightarrow b \in c$$

**Аксиома 2** (пустого множества). Существует  $\emptyset : \forall x. \neg x \in \emptyset$

*Примечание.* Также можно определить пустое множество как константу теории.

**Аксиома 3** (пары). Если  $a \neq b$ , то  $\{a, b\}$  — множество.

В формальном виде:

$$\forall a. \forall b. a \neq b \rightarrow \exists p. a \in p \ \& \ b \in p \ \& \ \forall t. t \in p \rightarrow t = a \vee t = b$$

*Примечание.* Иначе мы можем получать нечто похожее на открытые множества в топологии стрелки, где у нас нет конечного множества, содержащего некоторый элемент.

**Аксиома 4** (объединения). Если  $x$  — непустое множество, то  $y = \bigcup x$  — множество.

В формальном виде:

$$\forall x. \underbrace{\exists (y. y \in x)}_{x \text{ непустое}} \rightarrow \exists p. \forall y. y \in p \leftrightarrow \exists s. y \in s \ \& \ s \in x$$

**Аксиома 5** (степени). Для множества  $x$  существует  $\mathcal{P}(x)$  — множество всех подмножеств.

В формальном виде:

$$\forall x. \exists p. \forall y. y \in p \leftrightarrow y \subseteq x$$

*Пример.*

$$\mathcal{P}(\{a, b\}) = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}\}$$

**Аксиома 6** (схема выделения). Если  $a$  — множество,  $\varphi(x)$  — формула, в которую не входит свободно  $b$ , то  $\{x \mid x \in a \ \& \ \varphi(x)\}$  — множество.

В формальном виде:

$$\forall x. \exists b. \forall y. y \in b \leftrightarrow y \in x \ \& \ \varphi(y)$$

*Примечание.* Это схема аксиомы, т.к. здесь присутствует метаварiable  $\varphi$ .

**Аксиома 7** (бесконечности). Существует множество  $N$  такое, что:

$$\emptyset \in N \ \& \ \forall x. x \in N \rightarrow x \cup \{x\} \in N$$

**Теорема 33.** Если  $x$  — множество, то  $\{x\}$  — множество, т.е.  $\exists t. a \in t \leftrightarrow a = x$

*Доказательство.* Рассмотрим случаи:

1.  $x = \emptyset$ . Тогда  $t = \mathcal{P}(x)$ .
2.  $x \neq \emptyset$ . Тогда  $s = \{x, \emptyset\}$  — существует по аксиоме пары,  $t = \{z \mid z \in s \ \& \ z \neq \emptyset\}$ .

□

**Теорема 34.** Если  $a, b$  — множества, то  $a \cup b$  — множество.

*Доказательство.* Рассмотрим случаи:

1.  $a = b$ . Тогда  $a \cup b = a$
2.  $a \neq b$ . Тогда  $a \cup b = \{a, b\}$  — существует по аксиоме [пары](#)

□

*Обозначение.*  $a, b$  — множества. Тогда  $a \cup b$  — такое  $c$ , что:

$$a \subseteq c \ \& \ b \subseteq c \ \& \ \forall t. t \in c \rightarrow t \in a \vee t \in b$$

**Определение.**  $a' = a \cup \{a\}$

*Обозначение* (ординальные числа).

- $\bar{0} = \emptyset$
- $\bar{1} = \emptyset' = \{\emptyset\}$
- $\bar{2} = \emptyset'' = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$
- $\bar{3} = \emptyset''' = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}$

**Определение.** Множество  $S$  **транзитивно**, если:

$$\forall a. \forall b. a \in b \ \& \ b \in S \rightarrow a \in S$$

**Определение.** Множество  $s$  **вполне упорядочено** отношением “ $\in$ ”, если:

1.  $\forall a. \forall b. a \in s \ \& \ b \in s \rightarrow a \in b \vee b \in a \vee a = b$  — линейность
2.  $\forall t. t \subseteq s \rightarrow \exists a. a \in t \ \& \ \forall b. b \in t \rightarrow b = a \vee a \in b$  — в любом подмножестве есть наименьший элемент

**Определение.** **Ординал** — вполне упорядоченное отношением “ $\in$ ” транзитивное множество.

**Определение. Предельный ординал** — непустой ординал, не имеющий предшественника:

$$\forall p. p' \neq s$$

*Пример.*

$$\omega = \{\emptyset, 1, 2, \dots\}$$

Очевидно, что  $\omega \subseteq N$

**Теорема 35.**  $\omega$  — множество.

**Определение.**

$$a + b = \begin{cases} a, & b = 0 \\ (a + c)', & b = c' \\ \sup_{c \in b} (a + c), & b - \text{предельный} \end{cases}$$

**Определение.**  $\sup t$  — минимальный ординал, содержащий все элементы  $t$ .

*Пример.*  $a = \{0, 1, 3\}$  — не ординал, т.к. транзитивность не выполнена, т.к.  $2 \in 3$ , но  $2 \notin a$ .  
 $\sup\{0, 1, 3\} = \{0, 1, 2, 3\}$

*Пример.*

$$1 + \omega = \sup_{c \in \omega} (1 + c) = \sup\{0 + 1, 1 + 1, \dots\} = \sup\{1, 2, \dots\} = \omega$$

*Пример.*

$$\omega + 1 = \omega' = \{0, 1, 2, \dots, \omega\}$$

# Лекция 13

## 21 мая

### 8.1 Аксиома выбора

**Аксиома 8.** Эквивалентны следующие формулировки:

- На любом семействе<sup>1</sup> непустых множеств  $\{A_S\}_{S \in \mathbb{S}}$  можно определить функцию  $f : \mathbb{S} \rightarrow \bigcup_S A_S$ , которая по множеству возвращает его элемент.
- Любое множество можно вполне упорядочить.
- Для любой сюръективной функции  $f : A \rightarrow B$  найдётся частично обратная  $g : B \rightarrow A$ , т.е.  $g(f(x)) = x$ .

*Примечание.* Эта аксиома странная, т.к. по третьей формулировке любую хеш-функцию можно сломать. Конечно, они все ломаются перебором, но это не относится к реальному миру.

*Примечание.* Эта аксиома не конструктивна — сказано, что можно построить функцию/-порядок, но не сказано, как.

*Примечание.* Аксиома выбора не даёт парадоксов.

*Примечание.* Можно рассматривать теорию множеств без этой аксиомы, она тоже часто используется и обозначается  $\mathbf{ZF}^2$ , а с аксиомой выбора обозначается  $\mathbf{ZFC}^3$ .

**Определение.** Дизъюнктное семейство множеств — семейство непересекающихся подмножеств.<sup>4</sup>

$$D(y) : \forall p. \forall q. p \in y \ \& \ q \in y \rightarrow p \cap q = \emptyset$$

<sup>1</sup> Это синоним слову “множество”.

<sup>2</sup> Zermelo–Fraenkel

<sup>3</sup> Zermelo–Fraenkel–Choice

<sup>4</sup> Кажется, в формализации ошибка, т.к. если  $p = q$ , то всё ломается. Нужно в конец добавить  $\vee p = q$ .

**Определение** (прямое произведение дизъюнктного множества).

$$\times S = \{t \mid \forall p. p \in S \leftrightarrow \exists! c. c \in p \ \& \ c \in t\}$$

Формулировка аксиомы выбора, которую мы будем использовать:

**Аксиома** (выбора). Если  $D(y) \ \& \ \forall t. t \in y \rightarrow t \neq \emptyset$ , то  $\times y \neq \emptyset$

*Примечание.* В матанализе аксиома выбора используется для эквивалентности предела по Коши и по Гейне.

**Теорема 36** (Диаконеску). Рассмотрим ZF поверх ИИП<sup>5</sup>. Если добавить аксиому выбора, то  $\vdash \alpha \vee \neg \alpha$ .

**Аксиома 9** (фундирования).

$$\forall x. x = \emptyset \vee \exists y. y \in x \ \& \ y \cap x = \emptyset$$

Иными словами, в каждом непустом множестве есть элемент, не пересекающийся с ним.

*Примечание.* Эта аксиома запрещает самосодержащие множества.

*Примечание.* Без аксиомы **фундирования** нельзя определить  $\{a, \{a, b\}\}$  как пару, но можно  $\{\{a\}, \{a, b\}\}$ .

**Аксиома 10** (схема подстановки, Френкеля). Если  $S$  — множество,  $f$  — функция, т.е. существует формула  $\varphi(x, y) : \forall x \in S. \exists! y. \varphi(x, y)$ , то  $f(S)$  — множество.

## 8.2 Мощность множеств

**Определение.** Множества  $a$  и  $b$  **равномощны**, если существует биекция  $a \rightarrow b$  и обозначается  $|a| = |b|$ .

**Определение.** Кардинальное число  $t$  — ординал  $x$ , такой что для всех  $y \in x$   $|y| \neq |x|$

**Определение.** **Мощность**  $|x|$  — такое кардинальное число  $t$ , что  $|t| = |x|$ .

**Определение** (строго большая мощность).  $|a| < |b|$ , если существует  $f : a \rightarrow b$  — инъективно, но нет биекции.

*Утверждение.* Если  $a, b$  — кардиналы и  $|a| = |b|$ , то  $a = b$ .

- $\bar{0}, \bar{1}, \dots$  — конечные кардиналы.
- $\aleph_0 = |\omega|$
- $\aleph_1$  — следующий кардинал за  $\aleph_0$ .
- $\vdots$

---

<sup>5</sup> а не КИП

*Пример.*  $|\omega| = |\omega + 1|$ , следовательно  $|\omega + 1|$  не кардинал, т.к.  $\omega \in \omega + 1$ .

**Теорема 37** (Кантора). Рассмотрим множество  $S$  и  $\mathcal{P}(S)$ . Тогда  $|\mathcal{P}(S)| > |S|$

*Доказательство.* Пусть  $f : S \rightarrow \mathcal{P}(S)$  — биекция. Построим  $x \in \mathcal{P}(S)$ , не имеющий прообраза. Это можно сделать диагональным методом:  $t = \{s_k \in S \mid s_k \notin f(s_k)\}$ .  $\square$

Напоминание:  $\aleph_1$  — наименьший кардинал такой, что  $\aleph_1 > \aleph_0$ . Существует ли он? Да, т.к.  $|\mathcal{P}(\aleph_0)| > \aleph_0$  по теореме Кантора.

Является ли  $\aleph_1 = \mathcal{P}(\aleph_0)$ ? Это континуум-гипотеза, и её отрицание нельзя доказать.

**Теорема 38** (Кантора-Бернштейна). Если  $a, b$  — множества,  $f : a \rightarrow b$  и  $g : b \rightarrow a$  инъективны, то существует биекция  $a \rightarrow b$ .