

Основы наивной теории множеств.

Лектор — Станислав Олегович Сперанский

Создатель конспекта — Глеб Минаев *

Материалы лекций: ссылка

Литература:

- K. Hrbacek and T. Jech. Introduction to Set Theory. 3rd ed., revised and expanded. Marcel Dekker, Inc., 1999.
- T. Jech. Set Theory. 3rd ed., revised and expanded. Springer, 2002.

Будем рассматривать как базовые выражения “ x равен (совпадает с) y ” (“ $x = y$ ”) “ x лежит в y ” (“ $x \in y$ ”).

Определение 1 (Наивная схема аксиом выделения). Пусть $\Phi(x)$ — произвольное условие на объекты. Тогда существует X , что $\forall u(\Phi(u) \leftrightarrow u \in X)$. В этом случае X обозначается как $\{u \mid \Phi(u)\}$.

Утверждение 1 (парадокс Рассела). Пусть $R = \{u \mid u \notin u\}$. Тогда R не может лежать в себе и не может не лежать в себе одновременно.

Утверждение 2 (парадокс Берри). Пусть n — наименьшее натуральное число, которое нельзя описать менее чем одиннадцатью словами. Тогда n описывается 10 словами.

Из-за данного парадокса будем рассматривать только условия, образованные переменными и $\in, =, \neg, \wedge, \vee, \leftarrow, \leftrightarrow, \forall, \exists$.

Определение 2 (аксиомы ZFC (= ZF (аксиомы Цермело-Френкеля) + C (аксиома выбора))).

Ext) “Аксиома экстенциональности”:

$$\forall X \forall Y (\forall u (u \in X \leftrightarrow u \in Y) \leftrightarrow X = Y)$$

Empty) “Аксиома пустого множества”:

$$\exists \emptyset \forall u (u \notin \emptyset)$$

Pair) “Аксиома пары”:

$$\forall X \forall Y \exists Z (\forall u (u \in Z \leftrightarrow (u = X \vee u = Y)))$$

Обозначение: $Z = \{X, Y\}$.

Sep) “Схема аксиом выделения”:

$$\forall \Phi(x) \quad \forall X \exists Y \forall u (u \in Y \leftrightarrow (u \in X \wedge \Phi(u)))$$

Обозначение: $Y = \{u \in X \mid \Phi(u)\}$.

*Оригинал конспекта опубликован расположен GitHub

Следствие. *Операторы*

$$X \cap Y := \{u \mid u \in X \wedge u \in Y\}$$

$$X \setminus Y := \{u \in X \mid u \notin Y\}$$

$$\bigcap X := \{u \mid \forall v \in X \quad u \in v\}$$

определены корректно.

Union) “Аксиома объединения”:

$$\forall X \exists Y \forall u (u \in Y \leftrightarrow \exists v (v \in X \wedge u \in v))$$

Обозначение: $Y = \bigcup X$.

Следствие. *Оператор*

$$X \cup Y := \bigcup \{X, Y\} = \{u \mid u \in X \vee u \in Y\}$$

определён корректно.

Power) Пусть $x \subseteq y := \forall v \{v \in x \rightarrow v \in y\}$. “Аксиома степени”:

$$\forall X \exists Y \forall u (u \in Y \leftrightarrow u \subseteq X)$$

Обозначение: $Y = \mathcal{P}(X) := \{u \mid u \subseteq X\}$. $\mathcal{P}(X)$ — “множество-степень X ” или “булеан X ”.

Определение 3. Упорядоченная пара — это объект от некоторых X_1 и Y_1 , который равен другому такому объекту от X_2 и Y_2 тогда и только тогда, когда $X_1 = X_2 \wedge Y_1 = Y_2$.

Определение 4. *Декартово произведение* X и Y ($X \times Y$) — $\{(x; y) \mid x \in X \wedge y \in Y\}$.

Замечание 1. Можно несложно показать, что декартово произведение определено корректно.

Inf) Пусть $\text{Ind}(X) := \emptyset \in X \wedge \forall u (u \in X \wedge u \cup \{u\} \in X)$. Если $\text{Ind}(X)$, то X называется индуктивным. “Аксиома бесконечности”: существует индуктивное множество.

Repl) “Схема аксиом подстановки”:

$$\forall \Phi(x, y)$$

$$\forall x \forall y_1 \forall y_2 ((\Phi(x, y_1) \wedge \Phi(x, y_2)) \rightarrow y_1 = y_2) \rightarrow$$

$$\forall X \exists Y \forall y (y \in Y \leftrightarrow \exists x (x \in X \wedge \Phi(x, y)))$$

Reg) “Аксиома регулярности”:

$$\forall X (X \neq \emptyset \rightarrow \exists u (u \in X \wedge X \cap u = \emptyset))$$

1 Отношения.

Определение 5. Бинарное (или двухместное) отношение R между X и Y — подмножество $X \times Y$. Если $Y = X$, R называется бинарным (или двухместным) отношением на X .

Обозначение: $(x, y) \in R \Leftrightarrow xRy$.

Определение 6.

$$\begin{aligned}\text{dom}(R) &:= \{u \in X \mid \exists v \quad uRv\} && \text{“область определения } R\text{”} \\ \text{range}(R) &:= \{v \in Y \mid \exists u \quad uRv\} && \text{“область значений } R\text{”} \\ R[U] &:= \text{range}(R \cap (U \times Y)) \\ R^{-1} &:= \{(y, x) \mid (x, y) \in R\}\end{aligned}$$

Замечание 2.

$$\begin{aligned}\text{range}(R) &= \text{dom}(R^{-1}) = R[X] \\ \text{range}(R^{-1}) &= \text{dom}(R) = R^{-1}[Y]\end{aligned}$$

Определение 7. Бинарные отношения можно естественным образом комбинировать: для любых отношений R и Q между X и Y , Y и Z соответственно отношение

$$S = R \circ Q := \{(x, z) \in X \times Z \mid \exists y : xRy \wedge yQz\}$$

называется композицией R и Q .

Определение 8. Тожественное отображение на X — $\text{id}_X := \{(x, x) \mid x \in X\}$.

Замечание 3. Тожественное отображение при композиции (не важно, правой или левой) с другим отношением не меняет его.

Определение 9. Отношение R между X и Y называется функциональным, если

$$\forall x \forall y_1 \forall y_2 ((xRy_1 \wedge xRy_2) \rightarrow y_1 = y_2).$$

Определение 10. Функция из X в Y — функциональное отношение R между X и Y , в котором $\text{dom}(R) = X$. Обозначение: $R : X \rightarrow Y$.

Определение 11. Ограничение или сужение функции $f : X \rightarrow Y$ на $U \subseteq X$ — функция $f \upharpoonright_U := f \cap (U \times Y)$.

Если $f : X \rightarrow Y$ и $g : U \rightarrow Y$, где $U \subseteq X$, таковы, что $f \upharpoonright_U = g$, то f называется *расширением* g , а g — *ограничением* f .

Определение 12. $Y^X := \{f : X \rightarrow Y\}$.

Определение 13. Функция $f : X \rightarrow Y$ называется

- *сюръекцией*, если $\text{range}(f) = Y$;
- *инъекцией*, если f^{-1} функционально;
- *биекцией*, если f сюръективно и инъективно.

С) “Аксиома выбора”:

$$\forall X (\emptyset \notin X \rightarrow \exists f (f : X \rightarrow \bigcup X \wedge \forall u \in X (f(u) \in u)))$$

2 Натуральные числа и индукция

Важным следствием Inf является

$$\exists X(\text{Ind}(X) \wedge \forall Y(\text{Ind}(Y) \rightarrow X \subseteq Y)) \quad (\text{Nat})$$

Nat описывает минимальное по включению индуктивное множество — \mathbb{N} , \mathbb{N}_0 или ω .

Доказательство. Пусть есть какое-то индуктивное X_0 . Тогда рассмотрим

$$\mathbb{N} := \{x \in X_0 \mid \forall X(\text{Ind}(X) \rightarrow x \in X)\}$$

По построению $\text{Ind}(X) \rightarrow \mathbb{N} \subseteq X$. Также $\text{Ind}(\mathbb{N})$. □

Определение 14. Определим *функцию последователя* $s : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ как

$$s := \{(n, m) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \mid m = n \cup \{n\}\}$$

Вместо $s(n)$ часто пишут $n + 1$.

Определение 15. (*Естественный*) *порядок* на \mathbb{N} — $< := \{(n, m) \in \mathbb{N}^2 \mid n \in m\}$.

Замечание 4. Для всех $n, m \in \mathbb{N}$ верно:

1. $\neg(n < 0)$;
2. $n < m + 1 \leftrightarrow (n < m \vee n = m)$.

Теорема 3 (принцип индукции). Пусть X удовлетворяет условию

$$0 \in X \wedge \forall n \in \mathbb{N}(n \in X \rightarrow n + 1 \in X).$$

Тогда $\mathbb{N} \subseteq X$.

Доказательство. Из условия на X следует, что $\mathbb{N} \cap X$ индуктивно. Тогда из определения \mathbb{N} следует, что $\mathbb{N} \subseteq \mathbb{N} \cap X \subseteq X$, значит $\mathbb{N} \subseteq X$. □

Замечание 5. В качестве X могут быть $\{n \in \mathbb{N} \mid \Phi(n)\}$.

Следствие 3.1. $\forall n \in \mathbb{N}$ верно $n \subseteq \mathbb{N}$.

Теорема 4 (возвратная индукция). Пусть дан X , что $\forall n \in \mathbb{N}(\forall m < n \ m \in X \rightarrow n \in X)$. Тогда $\mathbb{N} \subseteq X$.

Доказательство. Докажем, что $\forall n \in \mathbb{N} \ n \subseteq X$, по индукции. База для 0 очевидна. Шаг очевиден, так как $n \subseteq X$, значит $n \in X$, значит $n + 1 \subseteq X$. □

Определение 16. $\text{Min}(X) := \{x \in X \mid \neg \exists u \in X \ u \in x\}$.

Теорема 5 (принцип минимального элемента). Если $X \subset \mathbb{N}$ и $X \neq \emptyset$, то $\text{Min}(X) \neq \emptyset$.

Доказательство. Пусть $\text{Min}(X) = \emptyset$. Возьмём $Y := \mathbb{N} \setminus X$. Заметим, что

$$\forall n \in \mathbb{N}(\forall m < n \ m \in Y \rightarrow n \in Y)$$

Тогда по принципу возвратной индукции $Y = \mathbb{N}$, а тогда $X = \emptyset$ — противоречие. □

Теорема 6 (о рекурсии). Пусть есть $y_0 \in Y$ и $h : \mathbb{N} \times Y \rightarrow Y$. Тогда существует и единственная $f : \mathbb{N} \rightarrow Y$ такая, что для любого $n \in \mathbb{N}$

$$f(n) = \begin{cases} y_0 & \text{если } n = 0 \\ h(m, f(m)) & \text{если } n = m + 1 \end{cases}$$

Доказательство. Пусть $k \in \mathbb{N}$. Тогда будем называть функцию $f : k + 1 \rightarrow Y$ *правильной*, если условие в определении рекурсии верно для всех $n \in k + 1$. Также рассмотрим

$$S := \{k \in \mathbb{N} \mid \text{существует единственная правильная } f : k + 1 \rightarrow Y\}$$

Будем обозначать для каждого $k \in S$ через f_k соответствующую правильную функцию из $k + 1$ в Y .

Докажем по индукции, что $S = \mathbb{N}$.

База. Очевидно, $\{(0, y_0)\}$ — единственная правильная функция из $0 + 1$ в Y . Поэтому $0 \in S$.

Шаг. Легко заметить, что сужение любой правильной функции на $k + 2$ на множество $k + 1$ правильно. Поэтому все правильные функции на $k + 2$ определены на $k + 1$ как f_k . Тогда значение в $k + 1$ определяется однозначно, значит правильная функция на $k + 2$ существует и единственна. \square

Теорема 7 (о рекурсии, параметризованная). Пусть $g_0 \in Y^X$ и $h : X \times \mathbb{N} \times Y \rightarrow Y$. Тогда существует и единственна $f : X \times \mathbb{N} \rightarrow Y$, что $\forall x \in X, n \in \mathbb{N}$

$$f(x, n) = \begin{cases} g_0(x) & \text{если } n = 0 \\ h(x, m, f(x, m)) & \text{если } n = m + 1 \end{cases}$$

Доказательство. Рассмотрим для каждого $x \in X$ функцию $h_x : \mathbb{N} \times Y \rightarrow Y, (n, y) \mapsto h(x, n, y)$. Тогда по теореме о рекурсии есть $f_x : \mathbb{N} \rightarrow Y$, что

$$f_x(n) = \begin{cases} g_0(x) & \text{если } n = 0 \\ h_x(m, f_x(m)) & \text{если } n = m + 1 \end{cases}$$

Тогда определим $f : X \times \mathbb{N} \rightarrow Y, (x, n) \mapsto f_x(n)$. В этом случае

$$f(x, n) = f_x(n) = \begin{cases} g_0(x) & \text{если } n = 0 \\ h_x(m, f_x(m)) & \text{если } n = m + 1 \end{cases} = \begin{cases} g_0(x) & \text{если } n = 0 \\ h(x, m, f(x, m)) & \text{если } n = m + 1 \end{cases}$$

\square

Замечание 6. Заметим, что с помощью теоремы о параметризованной рекурсии можно определить сложение, умножение и возведение в степень на натуральных числах.

Определение 17. Несложно заметить, что функциональные отношения $R \subseteq X \times Y$ — функции из подмножества X в Y . Поэтому будем называть их *частичными функциями* и обозначать как $R : \subseteq X \rightarrow Y$.

Теорема 8 (о рекурсии, частичной). Пусть $y_0 \in Y$ и $h : \subseteq \mathbb{N} \times Y \rightarrow Y$. Тогда существует и единственна $f : \subseteq \mathbb{N} \rightarrow Y$, что

- для любого $n \in \text{dom}(f)$,

$$f(n) = \begin{cases} y_0 & \text{если } n = 0 \\ h(m, f(m)) & \text{если } n = m + 1 \end{cases}$$

- либо $\text{dom}(f) = \mathbb{N}$, либо $\text{dom}(f) = k + 1$ для некоторого $k \in \mathbb{N}$, что $(k, f(k)) \notin \text{dom}(h)$.

Доказательство. Зафиксируем некоторое $y \notin Y$ и положим $Y' := Y \cup \{y\}$. Теперь расширим h до $h' : \mathbb{N} \times Y' \rightarrow Y'$ следующим образом:

$$h'(n, y') := \begin{cases} h(n, y') & \text{если } (n, y') \in \text{dom}(h) \\ y & \text{иначе} \end{cases}$$

В силу теоремы о рекурсии существует и единственна $f' : \mathbb{N} \rightarrow Y'$ такая, что для любого $n \in \mathbb{N}$,

$$f'(n) = \begin{cases} y_0 & \text{если } n = 0 \\ h'(m, f'(m)) & \text{если } n = m + 1 \end{cases}$$

Возьмём $f := f' \cup (\mathbb{N} \times Y)$. Несложно убедиться, что f будет искомой. □

Определение 18. Конечными последовательностями элементов X называются элементы множества $X^* := \{f \mid \exists n \in \mathbb{N}(f : n \rightarrow X)\}$.

Теорема 9 (о возвратной индукции). Пусть $h : \mathbb{N} \times Y^* \rightarrow Y$. Тогда существует единственная $f : \mathbb{N} \rightarrow Y$ такая, что для любого $n \in \mathbb{N}$, $f(n) = h(n, f \upharpoonright_n)$.

Доказательство. По аналогии с доказательством теоремы о рекурсии, однако вместо обычной индукции тут используется возвратная. [...] □

Определение 19. Условие $\Phi(x, y)$ называется функциональным, если

$$\forall x \forall y_1 \forall y_2 ((\Phi(x, y_1) \wedge \Phi(x, y_2)) \rightarrow y_1 = y_2)$$

Если для некоторого x нашёлся тот самый y , что $\Phi(x, y)$, тогда данный y обозначается как $\llbracket \Phi \rrbracket(x)$.

Функциональное условие $\Phi(x, y)$ называется тотальным, если $\forall x \exists y \Phi(x, y)$.

Теорема 10 (о возвратной “классовой рекурсии”). Пусть $\Phi(x, y)$ — тотальное функциональное условие. Тогда существует единственная функция f с $\text{dom}(f) = \mathbb{N}$, что $\forall n \in \mathbb{N}$

$$f(n) = \llbracket \Phi \rrbracket(f \upharpoonright_n)$$

Доказательство. Идея здесь та же, хотя деталей побольше. В нашем модуле эта теорема не будет играть особой роли, однако именно “классовая рекурсия” является базовым инструментом в ТМ. [...] □

3 Мощности

Определение 20. X и Y равномощны, если существует биекция $f : X \rightarrow Y$. Обозначение: $X \sim Y$.

Теорема 11. Для всех X, Y и Z верно следующее:

1. $X \sim X$;
2. $X \sim Y \Leftrightarrow Y \sim X$;
3. $X \sim Y \sim Z \Rightarrow X \sim Z$.

Пример 1. $\mathcal{P}(X) \sim 2^X$. Действительно, рассмотрим для каждого $Y \subseteq X$ функцию $\chi_Y : X \rightarrow 2$, что

$$\chi_Y(x) := \begin{cases} 1 & \text{если } x \in Y \\ 0 & \text{если } x \in X \setminus Y \end{cases}$$

Несложно заметить, что отображение, сопоставляющее Y функцию χ_Y есть биекция из $\mathcal{P}(X)$ в 2^X .

Определение 21. Множество X по мощности менее или равно Y ($X \preceq Y$), если существует инъекция из X в Y .

Множество X по мощности (строго) менее Y ($X \prec Y$), если $X \preceq Y \wedge X \not\sim Y$.

Замечание 7. Тогда очевидно, что $X \preceq Y$ тогда и только тогда, когда X равномощно некоторому подмножеству Y .

Теорема 12.

1. $X \preceq X$.
2. $X \sim Y \Rightarrow X \preceq Y$.
3. $X \preceq Y \sim Z \Rightarrow X \preceq Z$.
4. $X \sim Y \preceq Z \Rightarrow X \preceq Z$.
5. $X \preceq Y \preceq Z \Rightarrow X \preceq Z$.

Теорема 13 (Кантора, обобщённая). $X \prec \mathcal{P}(X)$.

Доказательство. Очевидно, что $f : X \rightarrow \mathcal{P}(X), x \mapsto \{x\}$ есть инъекция, поэтому $X \preceq \mathcal{P}(X)$. Покажем, что между ними нет биекции.

Предположим противное, т.е. есть биекция $f : X \rightarrow \mathcal{P}(X)$. Рассмотрим $Y := \{x \in X \mid x \notin f(x)\}$. Поскольку f — биекция, то $f(y) = Y$ для некоторого y . В итоге мы получаем

$$y \in Y \iff y \notin f(Y) \iff y \notin Y$$

Получаем противоречие. □

Теорема 14 (Кантора-Шрёдера-Бернштейна). Если $X \preceq Y$ и $Y \preceq X$, то $X \sim Y$.

Доказательство.

Лемма 14.1. Если $X \supseteq Y \supseteq X'$ и $X \sim X'$, то $X \sim Y \sim X'$.

Доказательство. Пусть $f : X \rightarrow X'$ — биекция. Определим по рекурсии $\{X_i\}_{i=0}^\infty$ и $\{Y_i\}_{i=0}^\infty$:

$$X_n := \begin{cases} X & \text{если } n = 0 \\ f[X_m] & \text{если } n = m + 1 \end{cases} \quad Y_n := \begin{cases} Y & \text{если } n = 0 \\ f[Y_m] & \text{если } n = m + 1 \end{cases}$$

По условию $X_0 = X \supseteq Y = Y_0$ и $Y_0 = Y \supseteq X' = f(X) = X_1$. Тогда несложно убедиться по индукции по n , что $X_n \supseteq Y_n \supseteq X_{n+1}$, так как $X_{n-1} \supseteq Y_{n-1} \supseteq X_n$, значит $f(X_{n-1}) \supseteq f(Y_{n-1}) \supseteq f(X_n)$, что буквально означает, что $X_n \supseteq Y_n \supseteq X_{n+1}$.

Тогда для каждого $n \in \mathbb{N}$ определим $U_n := X_n \setminus Y_n$. Пусть также $U := \bigcup_{n=0}^\infty U_n$, $Z := X \setminus U$.

Несложно видеть, что

$$X = \bigcup_{n=0}^{\infty} U_n \cup Z \qquad Y = \bigcup_{n=1}^{\infty} U_n \cup Z$$

Также несложно видеть, что $f[U_n] = f[X_n \setminus Y_n] = f[X_n] \setminus f[Y_n] = X_{n+1} \setminus Y_{n+1} = U_{n+1}$, а потому $f[U] = U \setminus U_0$.

Тогда определим $g : X \rightarrow X$ по правилу

$$g(x) := \begin{cases} f(x) & \text{если } x \in U \\ x & \text{если } x \in Z \end{cases}$$

Несложно видеть, что это инъекция. Действительно, g на U равна f , а значит есть биекция из U в $U \setminus U_0$, также является биекцией из Z в себя, а поскольку U и Z дизъюнкты, то g является биекцией из $U \cup Z$ в $U \setminus U_0 \cup Z$, т.е. из X в Y . Значит $Y \sim X$. \square

Пусть $f : X \rightarrow Y$ и $g : Y \rightarrow X$ — инъекции. Несложно видеть, что $g[Y] \subseteq X$, а $f[X] \subseteq Y$, значит $g[f[X]] \subseteq g[Y]$. Т.е. $X \supseteq g[Y] \supseteq g[f[X]]$. При этом $X \sim f[X] \sim g[f[X]]$, поэтому применяя лемму 14.1, имеем, что $X \sim g[Y] \sim Y$, значит $X \sim Y$. \square

Определение 22. Будем говорить, что X имеет n элементов (где $n \in \mathbb{N}$), если $X \sim n$.

X конечно, если для какого-то $n \in \mathbb{N}$, что $X \sim n$.

Утверждение 15. X бесконечно, значит $\forall n \in \mathbb{N} \quad |X| \geq n$.

Доказательство. Докажем по индукции по n .

База: $|X| \geq 0$ — очевидно.

Шаг: Пусть $|X| > n$, тогда существует инъекция $f : n \rightarrow X$. $f(n) \neq X$, поэтому есть $x \in X \setminus f(n)$, значит есть $f' = f \cup \{(n; x)\}$ — инъекция из $n + 1$ в X . \square

3.1 Основные свойства конечных множеств

Утверждение 16. X конечно, а $|Y| \leq |X|$, то $|Y|$ конечно.

Доказательство. Существует $n \in \mathbb{N}$, что $|X| = n$. Тогда Y конечно, так как иначе $n = |X| \geq |Y| \geq n + 1$. \square

Утверждение 17. Пусть есть сюръекция из X в Y , и X конечно. Тогда $|Y| \leq |X|$.

Доказательство. WLOG $X = n$ для некоторого $n \in \mathbb{N}$. Определим $g : Y \rightarrow n$ по правилу

$$g(y) := \text{“минимальный элемент в } f^{-1}[\{y\}]”$$

Легко понять, что $g : Y \rightarrow n$ — инъекция. Стало быть, $|Y| \geq |n| = n$. \square

Утверждение 18. Пусть X и Y конечны, причём $X \cup Y = \emptyset$. Тогда $X \cap Y$ конечно и $|X \cup Y| = |X| + |Y|$.

Доказательство. Докажем утверждение индукцией по $|Y|$.

База. Очевидно, если $|Y| = 0$, то $|Y| = \emptyset$, а потому $|X \cup Y| = |X| = |X| + 0 = |X| + |Y|$.

Шаг. Пусть $|Y| = n + 1$, т.е. существует биекция $f : n + 1 \rightarrow Y$. Рассмотрим $y = f^{-1}(n)$ и $Z := Y \setminus \{y\}$. Очевидно, что $|Z| = n$. Тогда

$$\begin{aligned} |X \cup Y| &= |(X \cup Z) \cup \{y\}| &= |X \cup Z| + 1 &= (|X| + |Z|) + 1 \\ &= |X| + (|Z| + 1) &= |X| + |Y| \end{aligned}$$

\square

Утверждение 19. Пусть X и Y конечны. Тогда $X \times Y$ и X^Y конечны и $|X \times Y| = |X| \cdot |Y|$, $|X^Y| = |X|^{|Y|}$.

3.2 Основные свойства (не более чем) счётных множеств

Утверждение 20 (в ZFC). Пусть X бесконечно, тогда оно содержит счётное подмножество.

Доказательство. Пусть η — какая-нибудь функция выбора для $\mathcal{P}(X) \setminus \{\emptyset\}$. Используя рекурсию, определим $f : \mathbb{N} \rightarrow X$ по правилу

$$f(k) := \eta(X \setminus \text{range}(f \upharpoonright_k))$$

Как легко видеть, $f : \mathbb{N} \rightarrow X$ — инъекция. Поэтому $\text{range}(f)$ будет счётным подмножеством X . \square

Определение 23. \aleph_0 является кардиналом и обычно обозначается \aleph_0 .

Следствие 20.1 (в ZFC). $|X| > \aleph_0$ тогда и только тогда, когда X бесконечно и несчётно.

Утверждение 21. $|X| \leq \aleph_0$ тогда и только тогда, когда X конечно или счётно.

Доказательство. Если X конечно или счётно, то, очевидно, $|X| \leq \aleph_0$.

Если $|X| \leq \aleph_0$, то WLOG $X \subseteq \mathbb{N}$. Если X бесконечно, то рекурсивно определим $f : \mathbb{N} \rightarrow X$ по правилу

$$f(k) := \text{“минимальный элемент в } X \setminus \text{range}(f \upharpoonright_k)\text{”}$$

Нетрудно проверить, что $f : \mathbb{N} \rightarrow X$ — биекция. \square

Следствие 21.1 (в ZFC). $|X| \not\leq \aleph_0$ тогда и только тогда, когда $|X| \leq \aleph_0$.

Утверждение 22. Есть сюръекция из X в Y , причём $|X| \leq \aleph_0$. Тогда $|Y| \leq \aleph_0$.

Доказательство. WLOG $X \subseteq \mathbb{N}$. Определим $g : Y \rightarrow X$ по правилу

$$g(y) := \text{“минимальный элемент в } f^{-1}[\{y\}]\text{”}$$

Легко понять, что $g : Y \rightarrow X$ — инъекция. Стало быть, $|Y| \leq |X| \leq \aleph_0$. \square

Следствие 22.1. Непустое X не более чем счётно тогда и только тогда, когда существует сюръекция из \mathbb{N} в X .

Следствие 22.2. Пусть R — отношение эквивалентности на X , причём X не более, чем счётно. Тогда X/R не более чем счётно.

Утверждение 23. Пусть X и Y не более чем счётны, тогда $X \times Y$ не более чем счётно.

Доказательство. WLOG $X, Y \subseteq \mathbb{N}$. Тогда $X \times Y \subseteq \mathbb{N} \times \mathbb{N}$, а значит нужно показать, что счётность $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$. Определим $\nu : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ по правилу

$$\nu(n, m) := \frac{(n+m)(n+m+1)}{2} + n$$

Нетрудно проверить, что ν биективна. \square

Следствие 23.1. $\forall n \in \mathbb{N}$

$$\underbrace{\mathbb{N} \times \dots \times \mathbb{N}}_n$$

счётно.

Следствие 23.2. Пусть X и Y не более чем счётны, тогда $X \cup Y$ не более чем счётно.

Доказательство. Поскольку X и $Y \setminus X$ равномощны некоторым подмножествам $\mathbb{N} \times \{0\}$ и $\mathbb{N} \times \{1\}$, то $X \cup Y = X \cup (Y \setminus X)$ равномощно подмножеству $\mathbb{N} \times \{0, 1\} \subseteq \mathbb{N} \times \mathbb{N}$, а потому не более чем счётно. \square

Утверждение 24. X конечно, а элементы X не более чем счётны. Тогда $\bigcup X$ не более чем счётно.

Доказательство. По индукции по $|X|$. \square

Определение 24. Условие “быть (бесконечной) последовательностью” — $\text{Seq}(F) := \exists Y : F : \mathbb{N} \rightarrow Y$. Если $\text{Seq}(F)$, то для любого $n \in \mathbb{N}$ вместо $F(n)$ нередко пишут F_n .

Утверждение 25. Если F — последовательность последовательностей, то тогда

$$\bigcup \{\text{range}(F_n) \mid n \in \mathbb{N}\}$$

не более чем счётно.

Доказательство. Определим $g : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \bigcup \{\text{range}(F_n) \mid n \in \mathbb{N}\}$ по правилу

$$g(n, m) := F_n(m) = F(n)(m)$$

Легко понять, что g сюръективна. \square

Следствие 25.1 (в ZFC). Пусть X не более чем счётно, и все его элементы не более чем счётны, тогда $\bigcup X$ не более чем счётно.

Доказательство. WLOG $X \neq \emptyset$ и $\emptyset \notin X$. Пусть g — сюръекция из \mathbb{N} на X . Для каждого $n \in \mathbb{N}$ положим

$$S_n := \{f \mid f : \mathbb{N} \rightarrow g(n) \text{ — сюръекция}\}$$

Очевидно, $S_n \neq \emptyset$ для всякого $n \in \mathbb{N}$. Обозначим $\{S_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ через \mathcal{J} . Пусть η — какая-нибудь функция выбора для \mathcal{J} . Наконец, определим $F : \mathbb{N} \rightarrow \bigcup \mathcal{J}$ по правилу

$$F(n) := \eta(S_n)$$

Ясно, что $\bigcup \{\text{range}(F_n) \mid n \in \mathbb{N}\} = \bigcup \{g(n) \mid n \in \mathbb{N}\} = \bigcup X$. \square

Теорема 26. Пусть непустое X не более чем счётно. Тогда X^* счётно.

Доказательство. Зафиксируем сюръекцию $g : \mathbb{N} \rightarrow X$. Очевидно, $f \circ g \in X^*$ для всякого $f \in \mathbb{N}^*$. Определим $G : \mathbb{N}^* \rightarrow X^*$ по правилу

$$G(f) := f \circ g$$

Легко убедиться, что G сюръективна. Поэтому достаточно показать, что \mathbb{N}^* не более чем счётно, а X^* бесконечно.

Пусть $\nu : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ — биекция. Разумеется, можно построить функции $\text{left} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ и $\text{right} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ такие, что для любых $n, m \in \mathbb{N}$,

$$\text{left}(\nu(n, m)) = n \quad \text{и} \quad \text{right}(\nu(n, m)) = m$$

Используя рекурсию, можно определить последовательность последовательностей f , удовлетворяющую следующим условиям:

$$\begin{aligned} f_0(i) &= \emptyset \\ f_{n+1}(i) &= f_n(\text{left}(i)) \cup \{(n, \text{right}(i))\} \end{aligned}$$

Далее несложно доказать по индукции, что для каждого $n \in \mathbb{N}$

$$\text{range}(f_n) = \{g \mid g : n \rightarrow \mathbb{N}\}$$

В таком случае $\bigcup \{\text{range}(f_n) \mid n \in \mathbb{N}\} = \mathbb{N}^*$. Поэтому \mathbb{N}^* не более чем счётно.

Осталось показать, что X^* бесконечно. Для этого выберем какой-нибудь $x_0 \in X$ и определим $h : \mathbb{N} \rightarrow X^*$ по правилу

$$h(n) := n \times \{x_0\},$$

т.е. $h(n)$ — последовательность длины n только из элемента x_0 . Очевидно, что h инъективна, а потому X^* не может быть конечным. \square

Определение 25. Для произвольного множества X обозначим

$$\mathcal{P}_{\text{fin}}(X) := \{Y \mid Y \subseteq X \text{ и } Y \text{ конечно}\}$$

Говоря просто, $\mathcal{P}_{\text{fin}}(X)$ — семейство конечных подмножеств X .

Следствие 26.1. Пусть X счётно. Тогда $\mathcal{P}_{\text{fin}}(X)$ счётно.

Доказательство. Рассмотрим $h : X^* \rightarrow \mathcal{P}_{\text{fin}}(X)$, действующую по правилу

$$h(f) := \text{range}(f)$$

Легко видеть, что h сюръективна, значит $\mathcal{P}_{\text{fin}}(X)$ не более чем счётно.

С другой стороны пусть $\nu : \mathbb{N} \rightarrow X$ — инъекция. Тогда рассмотрим $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{P}_{\text{fin}}(X)$, что

$$g(n) := \nu[n]$$

Несложно проверить, что $|\nu[n]| = n$, поэтому g инъективна, значит $\mathcal{P}_{\text{fin}}(X)$ бесконечно, а значит счётно. \square

Следствие 26.2. В следствие теоремы Кантора \mathcal{P} нельзя заменить на \mathcal{P}_{fin} .

Теорема 27 (в ZFC). Пусть X бесконечно, а Y не более чем счётно. Тогда $|X \cup Y| = |X|$.

Доказательство. Заменяя Y на $Y \setminus X$, имеем, что WLOG $X \cap Y = \emptyset$. При этом у X есть счётное подмножество Z . Тогда понятно, что $Z \cup Y$ счётно, а значит есть биекция $f : Z \cup Y \rightarrow Z$. Тогда определим $g : X \cup Y \rightarrow X$ так, что

$$g(x) := \begin{cases} f(x) & \text{если } x \in Z \cup Y \\ x & \text{если } x \in X \setminus Z \end{cases}$$

Очевидно, что g биективна. \square

Следствие 27.1. Пусть X более чем счётно, а Y не более чем счётно. Тогда $|X \setminus Y| = |X|$.

Доказательство. Пусть $U := X \cap Y$, а $V := X \setminus U$. Ясно, что U не более чем счётно, V бесконечно. Значит, $|X| = |V \cup U| = |V| = |X \setminus Y|$. \square

4 Упорядоченность

Определение 26. *Частично упорядоченное множество (ЧУМ) — пара из множества и частичного порядка на нём.*

Линейно упорядоченное множество (ЛУМ) — пара из множества и линейного порядка на нём.

Обозначение: $\mathfrak{A} = \langle A, \leq \rangle$.

Определение 27. Пусть даны ЧУМ $\mathfrak{A} = \langle A, \leq \rangle$ и непустое $S \subseteq A$. Тогда $a \in A$ является

- *максимальным элементом для S в \mathfrak{A} , если $a \in S \wedge \neg(\exists x \in S : a < x)$;*
- *минимальным элементом для S в \mathfrak{A} , если $a \in S \wedge \neg(\exists x \in S : x < a)$;*
- *наибольшим элементом для S в \mathfrak{A} , если $a \in S \wedge (\forall x \in S \quad x \leq a)$;*
- *наименьшим элементом для S в \mathfrak{A} , если $a \in S \wedge (\forall x \in S \quad a \leq x)$.*

Если $S = A$, то уточнение “для S ” опускают.

Также a является

- *верхней гранью для S в \mathfrak{A} , если $\forall x \in S \quad x \leq a$;*
- *нижней гранью для S в \mathfrak{A} , если $\forall x \in S \quad x \geq a$;*
- *супремумом гранью для S в \mathfrak{A} , если a — наименьшая верхняя грань для S в \mathfrak{A} ;*
- *инфимумом гранью для S в \mathfrak{A} , если a — наибольшая нижняя грань для S в \mathfrak{A} .*

Утверждение 28. В ЧУМ \mathfrak{A}

- *не более одного наибольшего в \mathfrak{A} элемента;*
- *всякий наибольший в \mathfrak{A} максимален в \mathfrak{A} ;*
- *любые два максимальных в \mathfrak{A} несравнимы.*

Аналогично для наименьших и минимальных элементов.

Утверждение 29. В ЛУМ все максимальные наибольшие и наоборот. Аналогично для минимальных и наименьших.

Определение 28. Гомоморфизм из $\langle A, \leq_A \rangle$ в $\langle B, \leq_B \rangle$ — отображение $f : A \rightarrow B$, что

$$a_1 \leq_A a_2 \Rightarrow f(a_1) \leq_B f(a_2)$$

В таком случае ещё говорят, что f сохраняет порядок.

Если f инъективно, а последнее условие усиливается до равносильности (а не остаётся следствием), то f называется *вложением* из $\langle A, \leq_A \rangle$ в $\langle B, \leq_B \rangle$.

Утверждение 30. Любой инъективный гомоморфизм из ЛУМ в ЧУМ является вложением.

Определение 29. Изоморфизм из \mathfrak{A} в \mathfrak{B} — сюръективное вложение из \mathfrak{A} в \mathfrak{B} . Обозначение: $\mathfrak{A} \simeq \mathfrak{B}$.

Утверждение 31. “Изоморфность” — “отношение эквивалентности” на ЧУМах. Т.е. для любых \mathfrak{A} , \mathfrak{B} и \mathfrak{C} верно:

1. $\mathfrak{A} \simeq \mathfrak{A}$;
2. $\mathfrak{A} \simeq \mathfrak{B} \Leftrightarrow \mathfrak{B} \simeq \mathfrak{A}$;
3. $\mathfrak{A} \simeq \mathfrak{B} \simeq \mathfrak{C} \Rightarrow \mathfrak{A} \simeq \mathfrak{C}$.

Определение 30. Изоморфизм из \mathfrak{A} на себя — *автоморфизм*.

С ЧУМами можно делать базовые преобразования:

1. Пусть даны ЧУМ $\mathfrak{A} = \langle A, \leq \rangle$ и $S \subseteq A$. Возьмём

$$\leq_S := \leq \cap S \times S$$

Тогда $\langle S, \leq_S \rangle$ — ЧУМ. Оно называется *индуцированным в \mathfrak{A} по S* . При этом из ЛУМ получится ЛУМ.

2. Пусть даны ЧУМ $\mathfrak{A} = \langle A, \leq_A \rangle$ и $\mathfrak{B} = \langle B, \leq_B \rangle$, причём A и B дизъюнкты. Возьмём

$$\leq := \leq_A \cup A \times B \cup \leq_B$$

Тогда $\langle A \cup B, \leq \rangle$ — ЧУМ, которое обозначается $\mathfrak{A} \oplus \mathfrak{B}$. При этом из двух ЛУМ всегда получится ЛУМ.

3. Пусть даны ЧУМ $\mathfrak{A} = \langle A, \leq_A \rangle$ и $\mathfrak{B} = \langle B, \leq_B \rangle$. Определим \leq на $A \times B$ по правилу

$$(a_1, b_1) \leq (a_2, b_2) :\Leftrightarrow a_1 \leq_A a_2 \wedge b_1 \leq b_2$$

Тогда $\langle A \times B, \leq \rangle$ — ЧУМ, где \leq традиционно называют *покоординатным порядком*. Понятно, что \leq мало когда бывает линейным.

4. Модифицируем предыдущую конструкцию, сделав одну из координат главной. Например, первую:

$$(a_1, b_1) \leq (a_2, b_2) :\Leftrightarrow a_1 < a_2 \vee (a_1 = a_2 \wedge b_1 \leq b_2)$$

Тогда $\langle A \times B, \leq \rangle$ — ЧУМ, которое обозначается $\mathfrak{A} \otimes \mathfrak{B}$. В таком случае из двух ЛУМ получается ЛУМ.

4.1 Трансфинитная индукция и фундированность

Определение 31. Для ЧУМ $\mathfrak{A} = \langle A, \leq \rangle$ верен *принцип трансфинитной индукции*, если для всякого $X \subseteq A$,

$$\forall x \in A ((\forall y < x) y \in X \rightarrow x \in X) \rightarrow X = A$$

Определение 32. Для ЧУМ $\mathfrak{A} = \langle A, \leq \rangle$ верен *принцип минимального элемента*, если для всякого $X \subseteq A$,

$$X \neq \emptyset \rightarrow \exists x \in X ((\forall y \in X) y \not< x)$$

Такие ЧУМ называются *фундированными*.

Теорема 32. Для ЧУМ верен принцип трансфинитной индукции тогда и только тогда, когда оно фундировано.

Доказательство. Пусть $X \subseteq A$. Обозначим $A \setminus X$ через \overline{X} . Тогда

$$\begin{aligned} \forall x \in A((\forall y < x)y \in X \rightarrow x \in X) &\rightarrow X = A \iff \\ X \neq A &\rightarrow \neg \forall x \in A((\forall y < x)y \in X \rightarrow x \in X) \iff \\ X \neq A &\rightarrow \exists x \in A \neg((\forall y < x)y \in X \rightarrow x \in X) \iff \\ X \neq A &\rightarrow \exists x \in A((\forall y < x)y \in X \wedge x \notin X) \iff \\ X \neq A &\rightarrow \exists x \in A((\forall y \notin X)y \not< x \wedge x \notin X) \iff \\ \overline{X} \neq \emptyset &\rightarrow \exists x \in \overline{X}((\forall y \in \overline{X})y \not< x) \end{aligned}$$

□

Утверждение 33.

1. Пусть даны фундированные ЧУМ \mathfrak{A} и \mathfrak{B} , что $A \cap B = \emptyset$. Тогда $\mathfrak{A} \oplus \mathfrak{B}$ будет фундированным.
2. Пусть даны фундированные ЧУМ \mathfrak{A} и \mathfrak{B} . Тогда $\mathfrak{A} \otimes \mathfrak{B}$ будет фундированным.

Определение 33. Вполне упорядоченное множество (ВУМ) — фундированное ЛУМ. Порядки ВУМ называются полными порядками.

Определение 34. Пусть дано ВУМ $\mathfrak{A} = \langle A, \leq \rangle$. Начальный сегмент — множество $S \subseteq A$, если для $\forall a_1, a_2 \in A$

$$(a_1 \leq a_2 \wedge a_2 \in S) \Rightarrow a_1 \in S$$

Определение 35. Пусть дано ВУМ $\mathfrak{A} = \langle A, \leq \rangle$. Множество

$$[0, a)_{\mathfrak{A}} := \{x \in A \mid x < a\}$$

является начальным сегментом \mathfrak{A} . Когда ясно, о каком \mathfrak{A} идёт речь, нижний индекс $_{\mathfrak{A}}$ обычно опускается.

Утверждение 34. Пусть \mathfrak{A} — ВУМ, а S — начальный сегмент \mathfrak{A} , отличный от A . Тогда существует единственный $a \in A$, что $S = [0, a)$.

Определение 36. $\text{IS}_{\mathfrak{A}}$ — множество всех начальных сегментов \mathfrak{A} , отличных от A , а

$$\subseteq_{\text{IS}_{\mathfrak{A}}} := \{(U, V) \in \text{IS}_{\mathfrak{A}} \times \text{IS}_{\mathfrak{A}} \mid U \subseteq V\}$$

Утверждение 35. Для любого ВУМ \mathfrak{A} верно, что $\mathfrak{A} \simeq \langle \text{IS}_{\mathfrak{A}}, \subseteq_{\text{IS}_{\mathfrak{A}}} \rangle$.

Доказательство. Несложно видеть, что

$$f : A \rightarrow \text{IS}_{\mathfrak{A}}, a \mapsto [0, a)$$

есть изоморфизм из \mathfrak{A} в $\langle \text{IS}_{\mathfrak{A}}, \subseteq_{\text{IS}_{\mathfrak{A}}} \rangle$.

□

Утверждение 36. Пусть \mathfrak{A} — ВУМ, а f — вложение из \mathfrak{A} в \mathfrak{A} . Тогда $f(a) \geq a$ для всех $a \in A$.

Доказательство. Рассмотрим

$$X := \{a \in A \mid f(a) < a\}$$

Предположим, что X непусто. Пусть a' — наименьший элемент для X в \mathfrak{A} . Тогда $f(a') < a'$, поэтому $f(f(a')) < f(a')$, что значит $f(a') \in X$. В таком случае $a' \leq f(a')$ — противоречие. □

Следствие 36.1. Для каждого ВУМ \mathfrak{A} единственным автоморфизмом \mathfrak{A} является id_A .

Доказательство. Пусть f — автоморфизм \mathfrak{A} . Очевидно, что f^{-1} также будет автоморфизмом \mathfrak{A} . Тогда для любого $a \in A$ имеем, что $f(a) \geq a$ и $f^{-1}(a) \geq a$, а значит $a \geq f(a) \geq a$, т.е. $f(a) = a$. Таким образом $f = id_A$. \square

Следствие 36.2. Для любых ВУМ \mathfrak{A} и \mathfrak{B} имеется не более одного изоморфизма из \mathfrak{A} в \mathfrak{B} .

Доказательство. Пусть f и g — изоморфизмы из \mathfrak{A} в \mathfrak{B} . Тогда несложно понять, что $f \circ g^{-1}$ есть автоморфизм, а значит $f \circ g^{-1} = id_A$. Следовательно $f = f \circ g^{-1} \circ g = id_A \circ g = g$. \square

Лемма 37. Никакой собственный начальный сегмент ВУМ \mathfrak{A} не изоморфен самому \mathfrak{A} .

Доказательство. Пусть f — изоморфизм из \mathfrak{A} на некоторый собственный начальный сегмент \mathfrak{A} . Тогда $\text{range}(f) = [0, a)$ для некоторого $a \in A$. Поэтому $f(a) < a$ — противоречие. \square

Теорема 38 (о сравнении ВУМ). Для любых ВУМ \mathfrak{A} и \mathfrak{B} имеет место ровно один из трёх случаев:

1. \mathfrak{A} и \mathfrak{B} изоморфны;
2. \mathfrak{A} изоморфно собственному начальному сегменту \mathfrak{B} ;
3. \mathfrak{B} изоморфно собственному начальному сегменту \mathfrak{A} .

При этом в пунктах (2) и (3) соответствующие собственные начальные сегменты определяются однозначно.

Доказательство. Единственность сегментов в (2) и (3) и взаимная исключаемость пунктов (1), (2) и (3) следуют из предыдущей леммы. Поэтому осталось показать, что один из трёх случаев точно будет иметь место.

Рассмотрим

$$\xi := \{(a, b) \in A \times B \mid [0, a)_{\mathfrak{A}} \simeq [0, b)_{\mathfrak{B}}\}$$

По предыдущей лемме ξ и ξ^{-1} являются функциональными.

Также несложно видеть, что если f — изоморфизм из $[0, a)_{\mathfrak{A}}$ на $[0, b)_{\mathfrak{B}}$, а $a' <_A a$ и $b' <_B b$, то

- $f \upharpoonright_{[0, a')_{\mathfrak{A}}}$ является изоморфизмом из $[0, a')_{\mathfrak{A}}$ на $[0, f(a'))_{\mathfrak{B}}$;
- $f^{-1} \upharpoonright_{[0, b')_{\mathfrak{B}}}$ является изоморфизмом из $[0, b')_{\mathfrak{B}}$ на $[0, f^{-1}(b'))_{\mathfrak{A}}$.

Следовательно, если $a \in \text{dom}(\xi)$, то $[0, a)_{\mathfrak{A}} \subseteq \text{dom}(\xi)$; если $b \in \text{range}(\xi)$, то $[0, b)_{\mathfrak{B}} \subseteq \text{range}(\xi)$. Поэтому ξ — биекция между начальными сегментами \mathfrak{A} и \mathfrak{B} . Также следует и то, что $a_1 <_A a_2 \Leftrightarrow f(a_1) <_B f(a_2)$, что значит, что ξ — изоморфизм между начальными сегментами \mathfrak{A} и \mathfrak{B} .

Если $\text{dom}(\xi) \neq A$, а $\text{range}(\xi) \neq B$, то существуют $a \in A$ и $b \in B$, что $\text{dom}(\xi) = [0, a)_{\mathfrak{A}}$, а $\text{range}(\xi) = [0, b)_{\mathfrak{B}}$. Это значит, что $(a, b) \in \xi$ — противоречие. Значит $\text{dom}(\xi) = A$ или $\text{range}(\xi) = B$, откуда следует желаемое. \square