Основы топологии

Оглавление

Глава 1

Основные понятия

1.1 Метрическое пространство

Определение. *Метрикой* на множестве X называют $\rho : X \to \mathbb{R}$, удовлетворяющую аксиомам метрики:

- $\rho(x) \geqslant 0$
- $\rho(x, y) = \rho(y, x)$
- $\rho(x, y) + \rho(y, z) \geqslant \rho(x, z)$

Определение. Пару $\langle X, \rho\rangle$, где ρ — метрика на X, называют *метрическим пространством*

Примеры.

- Стандартная метрика на $\mathbb{R}^n$: $\rho(x, y) = |x, y|_2$, где $d_k(x, y) \overset{def}{=} |x, y|_k = \sqrt[k]{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^k}$
- $|., .|_k$ является метрикой на $\mathbb{R}$ при любых $k \geqslant 1$
- $|x, y|_\infty = \max_{i=1}^{n}(x_i - y_i)$ — метрика на $\mathbb{R}$
- $\rho(x, y) = 1$ при $x \neq y$ и $\rho(x, y) = 0$ иначе — метрика, порождающая дискретное пространство.

Далее, если не указано, речь идет о метрическом пространстве X

Определение. *Шаром* радиуса r с центром в точке x называется

$$B_r(x) \overset{def}{=} \{\, y \in X \mid \rho(x, y) < r \,\}$$

Определение. *Замкнутым шаром* радиуса r с центром в точке x называется

$$\overline{B_r}(x) \overset{def}{=} \{\, y \in X \mid \rho(x, y) \leqslant r \,\}$$

Определение. *Расстоянием* от точки x до множества A называется

$$\rho(x, A) \overset{def}{=} \inf_{y \in A} \rho(x, y)$$

Определение. *Диаметром* множества A называется

$$\operatorname{diam}(A) = \sup\{\,\rho(x,y) \mid x,y \in A\,\}$$

Определение. В метрическом пространстве *открытыми* называют множества A такие, что

$$\forall x \in A\ \exists B_r(x) \subset A$$

Иначе говоря, любая точка открытого множества входит в него с некоторым шаром.

Определение. Множество A называют *ограниченным*, если $\operatorname{diam}(A) < +\infty$

Теорема 1.1.1. Множество A ограниченно $\iff$ его можно вписать в шар

Доказательство.

- $\Longrightarrow$ Пусть $m = \operatorname{diam}(A)$. Покажем, что A можно вписать в шар радиуса $m+1$. Возьмем произвольную точку $x \in A$. Тогда $\forall y \in A\ \rho(x,y) \leqslant m < m+1 \Longrightarrow y \in B_{m+1}(x)$
- $\Longleftarrow$ Пусть $y,z \in A$ и A можно вписать в шар $B_r(x)$. Тогда $2r > \rho(x,y)+\rho(x,z) \geqslant \rho(y,z) \Longrightarrow \rho(y,z) < 2r \Longrightarrow A$ ограничено.

∎

Теорема 1.1.2.

- Произольное объединение открытых множеств открыто
- Пересечение двух (а значит, и произвольного конечного числа) открытых множеств открыто.

Доказательство.

- Пусть $\{\,G_\alpha\,\}_{\alpha\in A}$ — семейство открытых множеств. Тогда

$$x \in \bigcup_{\alpha\in A} G_\alpha \Longrightarrow x \in G_\alpha \Longrightarrow \exists U(x) \subset G_\alpha \subset \bigcup_{\alpha\in A} G_\alpha$$

- Пусть A и B — открытые множества. Тогда

$$\begin{gathered} x \in A \cap B \Longrightarrow x \in A\ \wedge\ x \in B \Longrightarrow \\ \exists B_{r_1}(x) \subset A\ \wedge\ B_{r_2}(x) \subset B \Longrightarrow \\ x \in B_{\min(r_1,r_2)}(x) \subset A \cap B \end{gathered}$$

∎

Определение. *Липшицево эквивалентными* называют отображения f и g в $\mathbb{R}$, такие, что $\exists c_1, c_2\colon\ c_1 f \leqslant g \leqslant c_2 f$

Пример. В $\mathbb{R}^n$ метрики d_1 и d_2 липшицево эквивалентны

1.2 Топологическое пространство

Определение. *Топологией* на множестве X называют $\Omega \subseteq \mathcal{P}(X)$, удовлетворяющее следующим свойствам:

- $\varnothing, X \in \Omega$
- $A, B \in \Omega \Longrightarrow A \cap B \in \Omega$
- $\{X_\alpha \in \Omega\}_{\alpha \in A} \Longrightarrow \bigcup\limits_{\alpha \in A} X_a \in \Omega$

Иными словами, топология замкнута относительно конечных пересечений и произвольных объединений её элементов.

Определение. Пара $\langle X, \Omega \rangle$, где Ω — топология на X, называется *топологическим пространством*.

Определение. Элементы топологии называются *открытыми множествами*. Дополнения открытых множеств называются *замкнутыми множествами*.

Примеры.

- $\Omega = \mathcal{P}(X)$ — дискретная топология
- $\Omega = \{\varnothing, X\}$ — антидискретная топология
- Все метрические пространства являются топологическими пространствами, порожденными метрикой.
- $\Omega = \varnothing \cup \{\text{все дополнения конечных множеств}\}$

Определение. *Метризуемым* называется топологическое пространство, топология которого может быть порождена метрикой.

Примеры.

- Дискретная топология метризуема
- Антидискретная топология не метризуема

Определение. *Окрестностью* точки x называют любое открытое множество, содержащее x. Далее окрестность точки x будет обозначаться $U(x)$.

Определение. Точка x называется *внутренней* для множества A, если она входит в него с некоторой окрестностью:

$$\exists U(x) \colon \ U(x) \subset A$$

Определение. Точка x называется *граничной* точкой множества A, если любая окрестность точки x имеет непустое пересечение как с A, так и с его дополнением:

$$\forall U(x) \ \ A \cap U(x) \neq \varnothing \wedge (X \setminus A) \cap U(x) \neq \varnothing$$

Определение. Точка x называется *внешней* точкой A, если

$$\exists U(x)\ \ A\cap U(x)=\varnothing$$

Определение. Точка x называется *точкой прикосновения (предельной точкой)* множества A, если

$$\forall U(x)\ \ A\cap U(x)\neq\varnothing$$

Замечание. Точка прикосновения и внешняя точка — формальные отрицания друг друга.

Теорема 1.2.1.

- $\varnothing$, X замкнуты
- A, B замкнуты $\Longrightarrow A\cup B$ замкнуто
- если C_α замнкнуты, то $\bigcap_{\alpha\in A} C_\alpha$ замкнуто

Доказательство.

- $X = X\setminus\varnothing$ — замкнуто по опделелению. Аналогично $\varnothing = X\setminus X$
- $A\cup B$ замкнуто $\Longleftrightarrow X\setminus(A\cap B)$ открыто $\Longleftrightarrow (X\setminus A)\cup(X\setminus B)$ открыто $\Longleftarrow (X\setminus A)$, $(X\setminus B)$ открыты $\Longleftrightarrow A$, B замкнуты.
- Аналогично ii

■

Теорема 1.2.2. A открыто, B замкнуто. Тогда

- $A\setminus B$ открыто
- $B\setminus A$ замкнуто

Доказательство.

- $A\setminus B = A\cap(X\setminus B)$ — открыто
- $B\setminus A = B\cap(X\setminus A)$ — замкнуто

■

1.3 Внутренность и замыкание

Определение. *Внутренностью* множества A называют наибольшее по включению открытое множество, содержащееся в A, иначе говоря:

$$\mathrm{Int}(A) \stackrel{def}{=} \bigcup_{\substack{U \subseteq A \\ open_X(U)}} U$$

Определение. *Замыканием* множества A называют наименьшее по включению замкнутое множество, сожержащее A, иначе говоря:

$$\mathrm{Cl}(A) \stackrel{def}{=} \bigcap_{\substack{C \supseteq A \\ cl_X(C)}} C$$

Теорема 1.3.1. (Свойства Int)

- $\mathrm{Int}(A)$ открыто
- $\mathrm{Int}(A) \subseteq A$
- $open_X(B)$, $B \subseteq A \Longrightarrow B \subseteq \mathrm{Int}(A)$
- $\mathrm{Int}(A) = A \Longleftrightarrow open_X(A)$
- $\mathrm{Int}(\mathrm{Int}(A)) = A$
- $A \subseteq B \Longrightarrow \mathrm{Int}(A) \subseteq \mathrm{Int}(B)$
- $\mathrm{Int}(A \cap B) = \mathrm{Int}(A) \cap \mathrm{Int}(B)$
- $\mathrm{Int}(A \cup B) \supseteq \mathrm{Int}(A) \cup \mathrm{Int}(B)$

Доказательство.

- $\mathrm{Int}(A)$ открыто как объединение открытых
- В объединения входят только подмножества A, поэтому $\mathrm{Int}(A) \subseteq A$
- B по определению войдет в объединение
- $\Longrightarrow$ по пункту (i). $\Longleftarrow$ по пункту (iii)
- см. пункт (iv)
- Все открытые подмножества A являются открытыми подмножествами B
- $A \cap B \subseteq A$, $A \cap B \subseteq B \Longrightarrow$
  $\mathrm{Int}(A \cap B) \subseteq \mathrm{Int}(A), \mathrm{Int}(B) \Longrightarrow \mathrm{Int}(A \cap B) \subseteq \mathrm{Int}(A) \cap \mathrm{Int}(B)$

  $\mathrm{Int}(A) \cap \mathrm{Int}(B) \subseteq \mathrm{Int}(A) \subseteq A$, аналогично $\mathrm{Int}(A) \cap \mathrm{Int}(B) \subseteq B$, поэтому $\mathrm{Int}(A) \cap \mathrm{Int}(B) \subseteq A \cap B \Longrightarrow \mathrm{Int}(\mathrm{Int}(A) \cap \mathrm{Int}(B)) = \mathrm{Int}(A \cap B) \Longrightarrow \mathrm{Int}(A) \cap \mathrm{Int}(B) \subseteq \mathrm{Int}(A \cap B)$

■

Теорема 1.3.2. (Свойства Cl)

- $\mathrm{Cl}(A)$ замкнуто
- $\mathrm{Cl}(A) \supseteq A$
- $cl_X(B), B \supseteq A \Longrightarrow B \supseteq \mathrm{Cl}(A)$
- $\mathrm{Cl}(A) = A \Longleftrightarrow cl_X(A)$
- $\mathrm{Cl}(\mathrm{Cl}(A)) = A$
- $A \subseteq B \Longrightarrow \mathrm{Cl}(A) \subseteq \mathrm{Cl}(B)$
- $\mathrm{Cl}(A \cup B) = \mathrm{Cl}(A) \cup \mathrm{Cl}(B)$
- $\mathrm{Cl}(A \cap B) \subseteq \mathrm{Cl}(A) \cap \mathrm{Cl}(B)$

Доказательство. Можно доказать аналогично предыдущей теореме, а можно доказать, пользуясь переходом к дополнению в предыдущей теореме. ■

Теорема 1.3.3. (Связь Int и Cl)

- $X \setminus \mathrm{Int}(A) = \mathrm{Cl}(X \setminus A)$
- $X \setminus \mathrm{Cl}(A) = \mathrm{Int}(X \setminus A)$

Доказательство.

- $$X \setminus \mathrm{Int}(A) \overset{def}{=} X \setminus \Big(\bigcup_{\substack{U \subseteq A \\ open_X(U)}} U \Big) = \bigcap_{\substack{U \supseteq A \\ open_X(U)}} X \setminus U \overset{def}{=} \mathrm{Cl}(X \setminus A)$$

  так как множества вида $X \setminus U$ суть замкнутые множества, содержащие A
- Аналогично

■

Определение. *Границей* множества A называется

$$\mathrm{Fr}(A) \overset{def}{=} \mathrm{Cl}(A) \setminus \mathrm{Int}(A)$$

Теорема 1.3.4. (Свойства Fr)

- $\mathrm{Fr}(A)$ замкнуто
- $\mathrm{Fr}(A) = \mathrm{Fr}(X \setminus A)$
- A замкнуто $\Longleftrightarrow \mathrm{Fr}(A) \subseteq A$
- A открыто $\Longleftrightarrow \mathrm{Fr}(A) \cap A = \varnothing$

Доказательство.

- Очевидно в свете предыдущих теорем
- A замкнуто $\iff \mathrm{Cl}(A) = A \iff \mathrm{Cl}(A) \setminus \mathrm{Int}(A) \subseteq A$
- A открыто $\iff \mathrm{Int}(A) = A \iff \mathrm{Fr}(A) = \mathrm{Cl}(A) \setminus A \iff \mathrm{Fr}(A) \cap A = \varnothing$

■

Теорема 1.3.5. (Характеризация внутренности)
$\mathrm{Int}(A)$ — множество всех внутренних точек A.

Доказательство. Докажем, что $x \in \mathrm{Int}(A) \iff x$ — внутренняя точка A

$\implies$ $x \in \mathrm{Int}(A)$ — открыто $\implies U(x) = \mathrm{Int}(A) \subseteq A \implies x$ — внутренняя точка A

$\impliedby$ x — внутренняя для $A \implies \exists U(x) \subseteq A \implies x \in \mathrm{Int}(A)$ так как по определению $\mathrm{Int}(A)$ — это объединение всех открытых множеств, содержащихся в A, в том числе и $U(x)$. ■

Следствие 1.3.6. A открыто $\iff \forall x \in A$ x — внутренняя точка A

Теорема 1.3.7. (Характеризация замыкания)
$\mathrm{Cl}(A)$ — множество всех точек прикосновения A.

Доказательство.

$$X \setminus \mathrm{Cl}(A) = \mathrm{Int}(X \setminus A) = \{\text{внешние точки } A\} = X \setminus \{\text{точки прикосновения } A\}$$

■

Определение. Множество A называется *всюду плотным*, если $\mathrm{Cl}(A) = X$.

Определение. Топологическое пространство X называют *сепарабельным*, если в нем существует не более чем счетное всюду плотное множество.

Замечание. Всюду плотность множества A эквивалентна

- $\mathrm{Int}(X \setminus A) = \varnothing$.
- $\forall open_X(D)\ D \cap A \neq \varnothing$.

Доказательство.

- $\mathrm{Int}(X \setminus A) = X \setminus \mathrm{Cl}(A) = \varnothing$.
- Если это условие не выполнилось для какого-то непустого D, то любая его точка является внешней для множества A, а значит, не входит в замыкание. Если же это условие выполнилось для всех D, то любая окрестность любой точки пересекается с A (надо взять D = этой окрестности), значит, любая точка является точкой прикосновения A, о есть A всюду плотно.

■

Определение. Множество $A \subseteq X$ называют *нигде не плотным*, если внутренность его замыкание пуста: $\mathrm{Int}(\mathrm{Cl}(A)) = \varnothing$.

Замечание. Нигде не плотность множества A эквивалентна тому, что в любом непустом открытом множестве найдется открытое подмножество, не пересекающееся с A.

Теорема 1.3.8. В сепарабельном пространстве не существует более чем счетного дизъюнктного набора непустых открытых множеств.

Доказательство. Пусть U_i — более чем счетный дизъюнктный набор непустых открытых множеств. Выберем тогда из каждого U_i точку p_i, которая лежит в пересечение $U_i \cap S$, где S — какое-нибудь счетное всюду плотное множество. Получим, что $\{p_i\} \subseteq S$, то есть S более, чем счетно. ■

1.4 Сравнение топологий

Определение. Пусть Ω_1, Ω_2 — топологии на X. Говорят, что топология Ω_1 *слабее* топологии Ω_2, если $\Omega_1 \subset \Omega_2$.

Теорема 1.4.1. (Сравнение метрических топологий)
Пусть d_1, d_2 — метрики на X, $Top(d)$ — топология, порожденная метрикой d. Тогда $Top(d_1) \subseteq Top(d_2)$ тогда и только тогда, когда в любом шаре по d_1 содержится шар по d_2 с таким же центром.

Доказательство.

- $\Longrightarrow$ Раз $Top(d_1) \subseteq Top(d_2)$, то шар $B_1(x,r)$ по метрике d_1 открыт в $Top(d_2)$, значит любая его точка, включая x, входит в $B_1(x,r)$ с некоторой окрестностью $B_2(x,r')$ во второй топологии.

- $\Longleftarrow$ Проверим, что открытое в первой топологии множество U открыто во второй топологии. Для этого проверим, что все его точки — внутренние по второй метрике. U открыто в $Top(d_1) \Longrightarrow \forall x \in U \ \exists\, B_1(x,r) \subseteq U \Longrightarrow \exists\, B_2(x,r) \subseteq U$.

■

Следствие 1.4.2. $d_1 \leqslant d_2 \Longrightarrow Top(d_1) \subseteq Top(d_2)$.

Следствие 1.4.3. $\exists c > 0\colon\ d_1 \leqslant c d_2 \Longrightarrow Top(d_1) \subseteq Top(d_2)$.

Следствие 1.4.4. d_1, d_2 липшицево эквивалентны $\Longrightarrow Top(d_1) = Top(d_2)$.

1.5 База топологии

Определение. *Базой топологии* Ω называют $\Sigma \subseteq \Omega$ такое, что

$$\forall U \in \Omega\ \exists \lambda_\alpha \in \Sigma\colon\ U = \bigcup \lambda_\alpha$$

Теорема 1.5.1. Σ — база топологиии Ω тогда и только тогда, когда

$$\forall x \in X\ \forall U(x)\ \exists V \in \Sigma\colon x \in V \subseteq U$$

Доказательство.

$\Longrightarrow$ Σ — база топологии, поэтому

$$\exists \lambda_\alpha \in \Sigma\colon\ U(x) = \bigcup \lambda_\alpha$$

Поэтому $\exists \alpha\colon x \in \lambda_\alpha$.

$\Longleftarrow$ Пусть A открыто, тогда

$$A = \bigcup_{x \in A} V(x)$$

■

Определение. Σ_x называется *базой топологии в точке* x, если

- $\forall V \in \Sigma_x\ x \in V$.
- $\forall U \in \Omega\colon\ x \in U\ \exists V \in \Sigma_x\colon x \in V \subseteq U$.

Замечание. Σ — база топологии тогда и только тогда, когда

$$\forall x \in X\ \Sigma_x = \{U \in \Sigma \mid x \in U\} \text{ — база топологии в } x$$

Замечание. $\forall x\ \Sigma_x$ — базы в точках, тогда $\bigcup \Sigma_x$ — база топологии.

Теорема 1.5.2. Σ — база некоторой топологии тогда и только тогда, когда

- $X = \bigcup \Sigma$.
- $\forall U, V \in \Sigma\ U \cap V$ представляется в виде объединения элементов Σ.

Доказательство.

$\Longrightarrow$ X открыто, поэтому обязательно выполнено первое условие. Второе условие выполнено потому, что $U \cap V$ открыто, то есть по определению должно представляться в виде объединения элементов Σ.

$\Longleftarrow$ Назначим Ω как всевозможные объединения множеств из Σ. Проверим, что Ω — топология.

- $\varnothing, X \in \Omega$ — очевидно.
- $\bigcup U \in X$ по построению.
- $U \cap V = \left(\bigcup U_i\right) \cap \left(\bigcup V_i\right) = \bigcup U_i \cap V_i$. $U_i \cap V_i$ открыто по посылке, поэтому $U \cap V$ открыто.

■

1.6 Индуцированная топология

Определение. Пусть X — топологическое пространство, $Y \subset X$. Тогда на Y можно завести топологию, которую называют *индуцированной*: множество $A \subset Y$ открыто тогда и только тогда, когда $\exists B \in \Omega(X)\colon\ A = B \cap Y$. В таком случае топологическое пространство $\langle Y, \Omega(Y)\rangle$ называют *подпространством*.

Теорема 1.6.1. (База подпространства в точке)
Пусть X — топологическое пространство, $Y \subset X$ — его подпространство, $y \in Y$, Σ_y — база X в точке y. Тогда

$$\{U \cap Y\}_{U \in \Sigma_y}$$

является базой индуцированной топологии в точке y.

Доказательство. Пусть $y \in A$ открыто в Y. Тогда по определению индуцированной топологии $\exists U \in \Omega(X)\colon\ A = U \cap Y \ni y$. Тогда по определению базы в точке $\exists V \in \Sigma_y\colon\ y \in V \subseteq U$. Тогда $y \in V \cap Y \subseteq U \cap Y$, что и требовалось. ∎

Следствие 1.6.2. Пусть Σ — база $\Omega(X)$, Y — подпространство X. Тогда

$$\{V \cap Y \mid V \in \Sigma\} \text{ — база } \Omega(Y)$$

Теорема 1.6.3. Пусть X — т.п., $Y \subset X$ — его подпространство, $A \subseteq Y$. Тогда

- $open_X(A) \Longrightarrow open_Y(A)$.
- $cl_Y(A) \Longleftrightarrow \exists cl_X(B)\colon\ B \cap Y = A$.
- $cl_X(A) \Longrightarrow cl_Y(A)$.
- $open_X(Y) \Longleftrightarrow (open_Y(A) \Longleftrightarrow open_X(A))$.
- $cl_X(Y) \Longleftrightarrow (cl_Y(A) \Longleftrightarrow cl_X(A))$.

Теорема 1.6.4. (О транзитивности индуцирования)
Пусть X — т.п., $X \supset Y \supset Z$, тогда топологии $Y \to Z$, $X \to Z$ совпадают.

Доказательство.

$$open_{X\to Z}(A) \Longleftrightarrow \exists open_X(U)\colon\ A = U \cap Z \Longleftrightarrow A = \underbrace{(U \cap Y)}_{open_Y} \cap Z \Longleftrightarrow open_{Y\to Z}(A).$$

∎

Замечание.

- $\mathrm{Cl}_X(A) \cap Y = \mathrm{Cl}_Y(A)$.
- $\mathrm{Int}_X(A) \cap Y \neq \mathrm{Int}_Y(A)$ (вообще говоря).

1.7 Аксиомы отделимости

Определение. Топологическое пространство называется *хаусдорфовым*, если

$$\forall x \neq y \ \exists \ U(x), U(y): \ U(x) \cap U(y) = \varnothing$$

Хаусдорфовость — вторая аксиома отделимости (T2).

Замечание. Все метрические пространства являются хаусдорфовыми.

Определение. Топологическое пространство удовлетворяет первой аксиоме отделимости (T1), если

$$\forall x \neq y \ \exists \ U(x): \ U(x) \not\ni y$$

Теорема 1.7.1. Т.п. X удовлетворяет T1 тогда и только тогда, когда в нем любое одноточечное множество замкнуто.

Определение. Множества A, B называются отделимыми, если

$$\exists U(A), U(B): \ U(A) \cap U(B) = \varnothing$$

Определение. Топологическое пространство называется *регулярным* (T3), если в нем выполняются свойства:

- Все одноточечные множества замкнуты (T1).
- $\forall x \ \forall cl_X(A): \ x \notin A \ \ x$ отделима от A.

Замечание. Регулярность эквивалентна набору свойств

- Все одноточечные множества замкнуты (T1).
- $\forall x \ \forall U(x) \ \exists V(x): \ \ \mathrm{Cl}(V) \subset U \ \ (U, V$ открыты).

Доказательство.

$\Longrightarrow$ Пусть $x \in A$ открыто, поэтому $\overline{A}$ замнкнуто, причем $x \notin \overline{A}$. Тогда x отделима от $\overline{A}$:

$$\exists U(\overline{A}), U(x): \ U(\overline{A}) \cap U(x) = \varnothing$$

Тогда можно взять $V = U(x)$: $\mathrm{Cl}(V) \cap \overline{A} = \varnothing$: если бы $\mathrm{Cl}(V) \cap \overline{A} \ni p$, то

$$\forall U(p) \ U(p) \cap U(x) \neq \varnothing$$

Но p — внутренняя точка $U(\overline{A})$, поэтому входит в нее с некоторой $U(p)$, которая пересекается с $U(x)$, чего быть не может.

$\Longleftarrow$ Снова перейдем к дополнению: множество $\overline{A}$ открыто, причем $x \in \overline{A}$. Тогда

$$\exists V(x): \ \ \mathrm{Cl}(V) \subset \overline{A}$$

Тогда можно отделить A и x множествами $X \setminus \mathrm{Cl}(V(x))$ и $V(x)$ соответственно.

■

Определение. Топологическое пространство называется *нормальным* (T4), если в нем любые два непересекающихся замкнутых множества отделимы.

Теорема 1.7.2. (Нормальность метризуемых пространств)
Все метризуемые топологические пространства нормальны.

Доказательство. Пусть A, B — непересекающиеся замкнутые множества. Тогда

$$\forall x \in A\ \exists r_x > 0\colon\ B(x, r_x) \cap B = \varnothing$$
$$\forall y \in B\ \exists r_y > 0\colon\ B(y, r_y) \cap A = \varnothing$$

Здесь мы воспользовались хаусдорфовостью метрических пространств. Положим

$$U = \bigcup_{x \in A} B\left(x, \frac{r_x}{2}\right)$$
$$V = \bigcup_{y \in B} B\left(y, \frac{r_y}{2}\right)$$

Эти множества открыты. Если мы докажем, что они не пересекаются, то множества A и B окажутся отделимыми. Пусть $U \cap V \neq \varnothing$, тогда (пусть $r_x \geqslant r_y$):

$$\exists r_x, r_y\colon\ B\left(x, \frac{r_x}{2}\right) \cap B\left(y, \frac{r_y}{2}\right) \neq 0 \Longrightarrow$$
$$\exists z\colon\ |xz| < \frac{r_x}{2},\ |yz| < \frac{r_y}{2} \Longrightarrow |xy| < \frac{r_x + r_y}{2} \leqslant \max(r_x, r_y) = r_x \Longrightarrow$$
$$B(x, r_x) \ni y$$

■

Замечание. T1, T2, T3 наследуются подпространством. T4, вообще говоря, нет.

Замечание. T1 $\Longleftarrow$ T2 $\Longleftarrow$ T3 $\Longleftarrow$ T4.

1.8 Аксиомы счетности

Определение. Топологическое пространство X удовлетворяет *первой аксиоме счетности* (1АС), если для любой точки $x \in X$ существует не более чем счетная база в этой точке.

Определение. Топологическое пространство X удовлетворяет *второй аксиоме счетности* (2АС), если существует не более чем счетная база X.

Теорема 1.8.1.

- 2АС $\Longrightarrow$ пространство сепарабельно.
- Метрическое пространство сепарабельно $\Longleftrightarrow$ оно удовлетворяет 2АС.

Доказательство.

- Пусть Σ — счетная база X. Выберем тогда из каждого элемента Σ по одной точке. Получим не более чем счетное всюду плотное множество.

- Пусть S — не более чем счетное всюду плотное множество. Тогда базой топологии можно назначить множество всевозможных шаров с центрами в точках S и радиусами $\frac{1}{n}$. Проверим, что это — действительно база топологии. Для этого достаточно проверить, что $\forall x \in X\ \forall U(x)\ \exists V \in \Sigma\colon\ x \in V \subset U$. U — открытое множество, поэтому x входит в него с некоторым шаром $B(x,r)$. Пусть $\frac{1}{n} < \frac{r}{2}$, тогда поскольку S всюду плотно, $\exists s \in S\colon \rho(x,s) < \frac{1}{n}$. Проверим теперь, что $x \in B\left(s, \frac{1}{n}\right) \subset U$. $x \in B$ потому, что $\rho(x,s) < \frac{1}{n}$, из неравенства треугольника нетрудно получить, что $B \subset B(x,r) \subset U$.

■

Определение. *Покрытием X* называется набор множеств $\mathcal{A} \subseteq 2^X$ такой, что

$$\bigcup \mathcal{A} \supseteq X$$

Определение. *Подпокрытием* называется подмножество покрытия.

Теорема 1.8.2. (Линделёфа) В пространстве со счетной базой из любого открытого покрытия можно выбрать не более чем счетное подпокрытие.

Доказательство. Любой элемент покрытия представляется в виде объединения элементов базы. Для каждого элемента базы поймем, входит ли он в какое-то множество покрытия. Возьмем теперь для каждого элемента базы по одному элементу покрытия, в разложение которой он входит (если такой элемент есть). Получим покрытие, мощность которого не превосходит мощности базы, то есть, не более чем счетное. ■

1.9 Непрерывность

Определение. Отображение топологических пространств $f : X \to Y$ называется *непрерывным,* если прообраз любого открытого множества открыт.

Замечание. Открытость в определении можно заменить на замкнутость.

Замечание. $f : X \to Y$ непрерыно $\Longleftrightarrow \forall B\ f^{-1}(\mathrm{Int}(B)) \subseteq \mathrm{Int}(f^{-1}(B))$.

Доказательство.

$\Longrightarrow$ $f^{-1}(\mathrm{Int}(B)) = \mathrm{Int}(f^{-1}(\mathrm{Int}(B))) \subseteq \mathrm{Int}(f^{-1}(B))$

$\Longleftarrow$ Пусть U открыто. Тогда $f^{-1}(U) = f^{-1}(\mathrm{Int}(U)) \subseteq \mathrm{Int}(f^{-1}(U)) \subseteq f^{-1}(U)$. Поэтому $f^{-1}(U) = \mathrm{Int}(f^{-1}(U))$, что и означает, что $f^{-1}(U)$ открыто.

■

Определение. Отображение называется *открытым*, если образ открытого множества всегда открыт.

Замечание. $f : X \to Y$ открыто $\Longleftrightarrow \forall A\ f(\mathrm{Int}(A)) \subseteq \mathrm{Int}(f(A))$.

Доказательство. Аналогично подобному замечанию о непрерывных отображениях. ■

Определение. Пусть $X \subset Y$, X — подпространство Y, тогда отображение

$$in_{X\to Y} : X \to Y,\ in(x) = x$$

называется *вложением* X в Y.

Замечание. Вложение непрерывно.

Теорема 1.9.1. (Композиция непрерывных отображений)
Пусть $f : X \to Y$, $g : Y \to Z$ непрерывны. Тогда $g \circ f : X \to Z$ непрерывно.

Доказательство. Пусть U открыто в Z. Тогда

$$(g \circ f)^{-1}(U) = f^{-1}(g^{-1}(U))$$

Открыто. ■

Замечание. Усиление и ослабление топологии оставляют непрерывные отображения непрерывными.

Теорема 1.9.2. (Непрерывность сужения)
Если $f : X \to Y$ непрерывно, $Z \subseteq X$ — подпространство X, тогда $f\big|_Z$ непрерывно.

Доказательство. $f\big|_Z = f \circ in_{Z\to X}$ непрерывно как композиция непрерывных отображений. ■

Теорема 1.9.3. $f : X \to Y$ непрерывно $\Longleftrightarrow f(X) \subseteq Z \subseteq Y$, тогда $\hat{f} : X \to Z$, $\hat{f}(x) = f(x)$ непрерывно.

Доказательство.

$\Longleftarrow$ f непрерывно как композиция: $f = in_{Z\to Y} \circ \hat{f}$.

$\Longrightarrow$ Пусть V открыто в Z. Тогда $V = U \cap Z$, где U открыто в Y. Поэтому

$$\hat{f}^{-1}(V) = f^{-1}(V) = f^{-1}(U \cap Z) = f^{-1}(U) \cap f^{-1}(Z) = f^{-1}(U) \text{ — открыто в } X$$

■

Определение. $f : X \to Y$ непрерывно в $x \in X$, если

$$\forall U(f(x))\ \exists V(x):\ f(V) \subset U$$

Теорема 1.9.4. $f : X \to Y$ непрерывно $\Longleftrightarrow \forall x \in X$ f непрерывно в x.

Доказательство.

$\Longrightarrow$ Для любой точки и ее окрестности U можно взять $V = f^{-1}(U)$.

$\Longleftarrow$ Пусть U открыто в Y, покажем, что $f^{-1}(U)$ открыто в X, то есть любая точка $f^{-1}(U)$ внутренняя.

$x \in f^{-1}(U) \Longrightarrow \exists V(x):\ f(V) \subset U \Longleftrightarrow V \subset f^{-1}(U) \Longrightarrow x$ — внутренняя точка $f^{-1}(U)$

■

Теорема 1.9.5. (Непрерывность в точке в терминах баз)
Пусть $f : X \to Y$, Σ_x — база топологии в x, $\Lambda_{f(x)}$ — база топологии в $f(x)$. Тогда

$$f \text{ непрерывна в } x \Longleftrightarrow \forall U \in \Lambda_{f(x)}\ \exists V \in \Sigma_x : f(V) \subset U$$

Доказательство.

$\Longrightarrow$ Пусть $U \in \Lambda_{f(x)}$, тогда $f^{-1}(U)$ открыт, то есть в нем есть элемент базы Σ_x, что нам и нужно.

$\Longleftarrow$ Пусть U открыто в Y, тогда в U есть базовая окрестность $\Lambda_i \ni f(x)$. Для этого элемента по посылке существует базовая окрестность $\Sigma_i \ni x :\ f(\Sigma_i) \subseteq \Lambda_i$. Эта Σ_i и подходит под определение непрерывности в точке.

■

Определение. *Липшицевым* называется отображение метрических пространств $f : X \to Y$ такое, что $\exists C :\ \forall x_1, x_2 \in X\ \rho_Y(f(x_1), f(x_2)) \leqslant C \cdot \rho_X(x_1, x_2)$.

Теорема 1.9.6. Все липшицевы отображения непрерывны.

Доказательство. Зафиксируем базы топологий, состоящие из всевозможных шаров. Тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \; \exists \delta = \frac{\varepsilon}{C} \colon \; f(B_\delta(x)) \subseteq B_\varepsilon(f(x))$$

Что по теореме о непрерывности в терминах баз дает непрерывность в любой точке, а значит, и непрерывность на X. ■

Теорема 1.9.7. Пусть $f : \langle X, \Omega \rangle \to \langle Y, \Sigma \rangle$, $x \in X$. Топологическому пространству $\langle X, \Omega \rangle$ и точке x сопоставим топологическое пространство $\langle X, \Omega^x \rangle$:

$$\Omega^x = \{ \varnothing, A \mid \exists U(x) \subseteq A \}$$

Аналогично поступим и для Y и $f(x)$. Тогда f можно понимать как отображение между этими топологическими пространствами $\hat{f}$. В таком случае, верно утверждение:

$$f \text{ непрерывно в } x \iff \hat{f} \text{ непрерывно.}$$

Доказательство.

$\Longrightarrow$ Пусть множество $B \subseteq Y$ открыто в $\Sigma^{f(x)}$. В таком случае, $\exists V(f(x)) \subseteq B$ открытое в Σ. Прообраз V открыт по предположению, что f непрерывно в точке, поэтому, раз

$$f^{-1}(V) \subseteq f^{-1}(B)$$

то множество $f^{-1}(B)$ открыто в Ω^x, что и требовалось.

$\Longleftarrow$ Пусть теперь множество $f(x) \in B \subseteq Y$ открыто в Σ. Тогда оно автоматически открыто и в $\Sigma^{f(x)}$. Раз так, по посылке прообраз B открыт в Ω^x, что по определению дает существование требуемой для непрерывности в точки окрестности x.

■

Следствие 1.9.8. Пусть f непрерывно в x, g непрерывно в $f(x)$. Тогда $g \circ f$ непрерывно в x.

1.10 Гомеоморфизм

Определение. *Гомеоморфизмом* топологических пространств X и Y называют биективное в обе стороны непрерывное отображение этих пространств. Другими словами, отображение сопоставляет открытым множествам открытые (биективно). X и Y в таком случае называют *гомеоморфными*.

Определение. $f : X \to Y$ называется *вложением* X в Y, если оно осуществляет гомеоморфизм между X и $f(X)$.

Определение. Покрытие Γ пространства X называется *фундаментальным*, если выполнено:

$$\forall A \subseteq X \;\; [\forall C \in \Gamma \; open_C(A \cap C) \Longrightarrow open_X(A)]$$

Замечание. В определении, как всегда, можно везде заменить открытость на замкнутость.

Теорема 1.10.1. Пусть Γ — фундаментальное покрытие X, $f : X \to Y$, $\forall C \in \Gamma\ f\big|_C$ непрерывно, тогда f непрерывно на X.

Доказательство. Пусть U открыто в Y. Проверим, что $f^{-1}(U)$ открыто в X:

$$\forall C \in \Gamma\ f^{-1}(U) \cap C = \left(f\big|_C\right)^{-1}(U)$$

Последнее множество открыто в C потому, что $f\big|_C$ непрерывно. Тогда по самому определению фундаментального покрытия имеем, что $f^{-1}(U)$ открыто. ■

Теорема 1.10.2.

- Все открытые покрытия фундаментальны.
- Все конечные замкнутые покрытия фундаментальны.
- Все локально конечные замкнутые покрытия фундаментальны.

Доказательство.

- $A \cap C$ открыто в C для всех $C \in \Gamma$, C открыто в X, поэтому $A \cap C$ открыто в X. Раз так, $A = \bigcup A \cap C$ открыто в X.
- Совершенно аналогично первому пункту (за исключением того, что пользуемся определением фундаментальности в терминах замкнутых множеств и того, что объединение только конечного числа замкнутых множеств замкнуто).
- За каждой точкой зафиксируем окрестность U_x, имеющую пересечение с конечным множеством множеств из Γ. U_x — фундаментальное покрытие X (так как открытое). Пусть теперь $\forall C \in \Gamma\ A \cap C$ открыто в C. Тогда $\forall C \in \Gamma\ \forall x \in X\ A \cap C \cap U_x$ открыто в $C \cap U_x$ по определению индуцированной в $C \cap U_x$ топологии. Тогда $(A \cap C) \cap (C \cap U_x)$ открыто в $C \cap U_x$, где $C \cap U_x$ образует конечное замкнутое покрытие U_x (по построению). Это покрытие фундаментально по второму пункту, поэтому по определению его фундаментальности, $A \cap U_x$ открыто в U_x. Применяя снова определение фундаментальности, только уже к покрытию U_x, получаем открытость A.

■

1.11 Прямое произведение топологических пространств

Определение. Пусть $\langle X, \Omega \rangle$, $\langle Y, \Sigma \rangle$ — топологические пространства. Тогда их прямым произведением называется топологическое пространство с носителем $X \times Y$, база топологии которого состоит из всевозможных множеств вида

$$A \times B,\ A \in \Omega, B \in \Sigma$$

Лемма 1.11.1. Только что определенная система множеств действительно является базой топологии. Для этого достаточно проверить (теорема 1.5.2), что пересечение элементов базы представляется в виде объединения элементов той же базы:

$$(A\times B)\cap(A'\times B')=(A\cap A')\times(B\cap B')$$

Здесь объединение состоит из одного элемента.

Теорема 1.11.2. Прямое произведение замкнутых A, B замкнуто в прямом произведении топологий. *Замечание: прямое произведение открытых множеств открыто просто по определению.*

Доказательство. Покажем, что $(X\times Y)\setminus(A\times B)$ открыто:

$$(X\times Y)\setminus(A\times B)=(X\setminus A)\times Y\cap X\times(Y\setminus B)$$

■

Замечание. Пусть $A\subseteq X$, $B\subseteq Y$. Тогда

- $\mathrm{Cl}(A\times B)=\mathrm{Cl}(A)\times\mathrm{Cl}(B)$.
- $\mathrm{Int}(A\times B)=\mathrm{Int}(A)\times\mathrm{Int}(B)$.

Доказательство. Докажем второе утверждение:

$$\mathrm{Int}(A\times B)=\bigcup_{\substack{open_{X\times Y}(C)\\ C\subseteq A\times B}}C=\bigcup_{\substack{open_{X\times Y}(A'\times B')\\ A'\times B'\subseteq A\times B}}A'\times B'=\bigcup_{\substack{A'\subseteq A\\ open_X(A')}}A'\times\bigcup_{\substack{B'\subseteq B\\ open_Y(B')}}B'=\mathrm{Int}(A)\times\mathrm{Int}(B)$$

Первый переход можно сделать, потому что любое открытое множество C представляется в виде объединения множеств из базы. ■

Определение. Отображение

$$pr_x: X\times Y\to X,\ (x,y)\mapsto x$$

называется *проекцией* $X\times Y$ на X.

Теорема 1.11.3. Проекция непрерывна.

Доказательство. Пусть U открыто в X. Тогда $pr_X^{-1}(U)=U\times Y$ — открыто в $X\times Y$ по определению. ■

Теорема 1.11.4. Пусть X, Y, Z — топологические пространства, $f: Z\to X\times Y$, $f=(g,h)$, где $g: Z\to X$, $h: Z\to Y$. Тогда

$$f \text{ непрерывно } \Longleftrightarrow g,h \text{ непрерывны}$$

Доказательство.

$\Longrightarrow$ $g=pr_X\circ f$, $h=pr_Y\circ f$.

$\Longleftarrow$ Достаточно проверить открытость прообраза на базовых множествах:

$$f^{-1}(U \times V) = g^{-1}(U) \cap h^{-1}(V)$$

■

Следствие 1.11.5. *Координатный слой* гомеоморфен X:

$$X \times \{y_0\} \simeq X$$

Доказательство. Установим гомеоморфизм

$$f : X \to X \times \{y_0\}, \ x \mapsto (x, y_0)$$

Тогда

$$f^{-1} = pr_X\big|_{X \times \{y_0\}}$$

И оба предъявленных отображения непрерывны. ■

Теорема 1.11.6. Пусть X — т.п., $f, g : X \to \mathbb{R}$ непрерывны. Тогда $f + g$, fg, $\frac{f}{g}$ (при $g \neq 0$) непрерывны.

Доказательство. Будем пользоваться тем, что арифметические операции непрерывны:

$$X \xrightarrow{(f,g)} \mathbb{R}^2 \xrightarrow{+} \mathbb{R}$$

Здесь отображение $x \mapsto (f(x), g(x))$ непрерывно по последней теореме. ■

1.12 Связность

Определение. *Связным* называется пространство, которое нельзя разбить на два непустых непересекающихся открытых (замкнутых) множества.

Замечание. Связность эквивалентна условию: не существует непрерывного сюрьективного отображения $f : X \to \{0, 1\}$.

Доказательство.

$\Longrightarrow$ Если бы такое отображение существовало, X можно было бы разбить на открытые множества $f^{-1}(\{1\})$ и $f^{-1}(\{0\})$. Они непусты, так как f сюрьективно.

$\Longleftarrow$ Предположим, что пространстно можно разбить на два открытых непустых нерересекающихся множества A, B. Тогда положим

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \in A \\ 1, & x \in B \end{cases}$$

Это отображение непрерывно и сюрьективно, потому что множества A и B открыты и непусты.

■

Теорема 1.12.1. Непрерывный образ связного пространства связен.

Доказательство. Предположим, что это не так, то есть $f : X \to Y$, X связно и f непрерывно, но $f(X)$ несвязно. В таком случае, существует непрерывное сюрьективное отображение $g : f(X) \to \{0, 1\}$. Но тогда отображение $g \circ f$ непрерывно и сюрьективно, то есть X несвязно:

$$\begin{tikzcd} X \arrow[r, "f"] \arrow[rr, bend right, dashed, "g\circ f"'] & f(X) \arrow[r, "g"] & \{0,1\} \end{tikzcd}$$

■

Теорема 1.12.2. Отрезок $[0, 1]$ связен.

Доказательство. Предположим обратное и разобъем отрезок на два непересекающихся замкнутых множества A и B. Предположим не ограничиваю общности, что $0 \in A$. Тогда пусть $b = \inf B$. Множества замкнуты, поэтому $b \in B$ и $b \neq 0$. В таком случае $[0, b) \subseteq A$, из чего следует, что $b \in A$. ■

Определение. Множество $Y \subseteq X$ называется *связным*, если оно связно как индуцированное топологическое пространство.

Теорема 1.12.3. (Характеризация связных множеств на прямой)
На прямой связны только интервалы.

Доказательство.

$\Longrightarrow$ Предположим, что интервал несвязен. Тогда возьмем соответствующее разбиение A, B и пересечем его с $[a,b]$, где a, b взяты из интервала:

$$A' = A \cap [a,b]$$
$$B' = B \cap [a,b]$$

Тем самым мы получили, что $[a,b]$ несвязен, чего быть не может.

$\Longleftarrow$ Предположим, что Y — не интервал. Тогда по определению интервала существуют a, b, c такие, что $(a,b) \subseteq Y$, $c \notin Y$. Тогда положим $A = Y \cap (-\infty, c)$, $B = Y \cap (c, +\infty)$ — разбиение Y (оба множества не пусты из-за наличия в них a и b соответственно). Поэтому Y несвязно.

■

Теорема 1.12.4. (О среднем значении) Пусть X — связное топологическое пространство, $f : X \to \mathbb{R}$ непрерывно. Тогда $\forall a,b \in f(X)\ [a,b] \subseteq f(X)$.

Доказательство. $f(X)$ связно в $\mathbb{R}$, поэтому является интервалом, откуда незамедлительно следует утверждение теоремы. ■

Лемма 1.12.5. Замыкание связного множества связно.

Доказательство. Предположим обратное и разобъем замыкание на два непересекающихся непустых открытых в замыкании множества: $\mathrm{Cl}(A) = U \cup V$. Положим

$$U' = A \cap U$$
$$V' = A \cap V$$

Эти множества открыты в A по определению индуцированной из $\mathrm{Cl}(A)$ топологии. Осталось только проверить, что эти множества непусты. Пусть $p \in U \subseteq A$, поэтому p — точка прикосновения A, что дает $\forall U(p)\ U(p) \cap A \neq \varnothing$, откуда U' непусто. Аналогично получаем, что V' непусто. ■

Теорема 1.12.6. Объединение попарно пересекающихся связных множеств связно.

Доказательство. Пусть $A = \bigcup A_i$ несвязно, тогда разобъем его: $A = U \cup V$. Пусть теперь $p \in U$, $p \in A_i$, $q \in V$, $q \in A_j$. Поскольку A_i связно, $A_i \cap V = \varnothing$ (иначе бы получилось разбиение $A_i = (A_i \cap U) \cup (A_i \cap V)$). Аналогично $A_j \cap U = \varnothing$, откуда $A_i \cap A_j = \varnothing$, что противоречит условию. ■

Определение. *Компонентой связности* точки p называется объединение всех связных множеств, содержащих p.

Лемма 1.12.7. (Свойства компонент связности)

- Компоненты связности замкнуты.
- Компоненты связности не пересекаются, то есть X разбивается на компоненты связности.

- $p \sim q \Longleftrightarrow \exists$ связное A: $p \in A$, $q \in A$ — отношение эквивалентности.

Доказательство.

- Множество всегда можно замкнуть увеличив его (если оно не замкнуто) и сохранив при этом связность.
- Если бы компоненты пересекались, их можно было бы объединить в одну, сохранив связность и увеличив при этом множество.
- Следует из предыдущих утверждений.

■

1.13 Компактность

Определение. Топологические пространство называется *компактным*, если из любого его открытого покрытия можно выбрать конечное подпокрытие.

Теорема 1.13.1. Отрезок в $\mathbb{R}$ компактен.

Доказательство. Предположим противное: пусть U_i — покрытие отрезка открытыми множествами, из которого нельзя выбрать конечное. Разделим отрезок пополам. Для одной из половин нельзя будет выбрать конечное покрытие. Заменим отрезок на эту половину и продолжим этот процесс (отрезок на k-м шаге обозначим I_k). Из аксиомы Кантора найдется точка $p \in \bigcap I_k$. Пусть $p \in U_{i_0}$, тогда при больших k получаем, что $I_k \subseteq U_{i_0}$, что дает конечное покрытие для I_k. ■

Теорема 1.13.2. Любое замкнутое подмножество компакта — компакт.

Доказательство. Пусть $A \subseteq X$ замкнуто, U_i — открытое покрытие A. Тогда $U_i \cup \overline{A}$ — открытое покрытие X. Выберем из него конечное подпокрытие (X компакт). Выкинем из этого подпокрытия $\overline{A}$, если оно туда попало. Получим конечное подпокрытие для A. ■

Замечание. Конечное объединение компактов — компакт.

Теорема 1.13.3. Прямое произведение компактов — компакт.

Доказательство. Для доказательства достаточно рассмотреть покрытие $X \times Y$ базовыми окрестностями $U \times V$. $Y \simeq \{x_0\} \times Y$ — компакт, поэтому можно выбрать конечное подпокрытие этого множества:

$$\{x_0\} \times Y \subseteq \bigcup_{k=1}^{n} U_k \times V_k$$

Рассмотрим теперь покрытие X множествами $W_{x_0} = \bigcap_{k=1}^{n} U_k$, где U_k взяты из покрытия соответствующего $\{x_0\} \times Y$. Выберем из получившегося покрытия конечное:

$$X \subseteq \bigcup_{k=1}^{m} W_{x_k}$$

Получается, что $\forall x \in X\ W_x \times Y$ покрывается конечным набором множеств покрытия, поэтому

$$X \times Y \subseteq \bigcup_{k=1}^{m} W_{x_k} \times Y$$

Есть конечное покрытие $X \times Y$. ■

Теорема 1.13.4. (Характеризация компактов в $\mathbb{R}^m$)
В $\mathbb{R}^m$ компактность равносильна замкнутости и ограниченности.

Доказательство.

- $\Longrightarrow$ Накроем компакт всевозможными шарами, вытащим оттуда конечное покрытие, получим ограниченность. Замнкутость доказывается в следующей теореме.

- $\Longleftarrow$ По последней теореме имеем, что $[a, b]$ компактен в $\mathbb{R}^m$. Любое ограниченное множество можно вписать в подобный параллелепипед, поэтому это множество — замкнутое подмножество компакта, то есть компакт.

■

Теорема 1.13.5. В хаусдорфовом пространстве компакты замкнуты.

Доказательство. Докажем открытость дополнения компакта K. Пусть $x \notin K$. Покажем, что x входит в K^c с некоторой окрестностью. Для каждой точки $y \in K$ из хаусдорфовости построим окрестности

$$\exists U(y), U(x):\ \ U(y) \cap U(x) = \varnothing$$

$U(y)$ образуют конечное покрытие K. Выберем из него конечное:

$$K \subseteq \bigcup_{k=1}^{n} U(y_k)$$

Тогда $\bigcap U_k(x)$ открыто как конечное пересечение открытых, причем по построению $\bigcap U_k(x) \cap K = \varnothing$, поэтому x лежит в K^c с этой окрестностью. ■

Теорема 1.13.6. Любое хаусдорфово компактное пространство регулярно.

Теорема 1.13.7. Любое хаусдорфово компактное пространство нормально.

Доказательство. Последние две теоремы доказываются по очереди так же, как и теорема о замкнутости, только в каждой следующей теореме надо пользоваться предыдущей. ■

Теорема 1.13.8. (Вейерштрасс)
Пусть X — хаусдорфово топологическое пространство, $f : X \to \mathbb{R}$ непрерывно, тогда $\exists \max f, \min f$.

Доказательство. Теперь очевидно. ■

Теорема 1.13.9. Пусть X — компакт, Y — хаусдорфово т.п., $f : X \to Y$ — непрерывная биекция, тогда f гомеоморфизм.

Доказательство. Все, что надо доказать, чтобы f стало гомеоморфизмом, это то, что f^{-1} непрерывно. Проверим, что под действием f^{-1} прообразы замкнутых множеств замкнуты. Пусть $A \subseteq X$ — замкнуто, то есть и компактно. Прообраз этого множества под действием f^{-1} в точности совпадает с $f(A)$ — непрерывным образом компакта, то есть компактом, то есть замкнутым множеством, что и требовалось. ■

Следствие 1.13.10. Непрерывное инъективное отображение компакта в хаусдорфово пространство всегда является топологическим вложением.

1.14 Линейная связность

Определение. *Путем* в топологическом пространстве X называется непрерывное отображение отрезка в X, то есть $C([a,b]) \ni \gamma : [a,b] \to X$.

Определение. Топологическое пространство называется *линейно связным*, если любые две его точки можно соединить путем.

Лемма 1.14.1. Пусть для любых двух точек $x, y \in X$ существует связное множество $I \subseteq X$, содержащее x, y. Тогда X связно.

Доказательство. Предположим обратное и разобъем X на открытые A, B. Выберем точки a, b из A и B соотрветственно. Пусть I — то связное множество, существование которого для точек a и b утверждается в условии. Тогда рассмотрим разбиение $I = (I \cap A) \cup (I \cap B)$. Множества разбиения непусты, непересекаются и открыты в топологии, индуцированной в I из X, из чего можно сделать вывод, что I несвязно. ■

Теорема 1.14.2. Всякое линейно связное пространство связно.

Доказательство. Для доказательства просто предъявим для произвольных двух точек X связное множество, содержащее эти две точки. Пусть $x, y \in X$, соединим их путем $\gamma : [a,b] \to X$. Отрезок связен, путь как отображение непрерывен, поэтому носитель пути тоже связен, то есть подходит в качестве связного множества, содержащего x, y. ■

Теорема 1.14.3. Непрерывный образ линейно связного пространства линейно связен.

Доказательство. Пусть $f : X \to f(X) \subseteq Y$ — непрерывное отображение линейно связного пространства X. Докажем, что $f(X)$ линейно связно. Пусть $x, y \in f(X)$, причем $x = f(a)$, $y = f(b)$ для каких-либо $a, b \in X$. Соединим путем $\gamma : [0,1] \to X$, $\gamma(0) = a$, $\gamma(1) = b$. Тогда подходящим путем в $f(X)$ будет отображение $f \circ \gamma : [0,1] \to f(X)$. ■

Замечание. В общем случае из связности **не следует** линейная связность.

Замечание. Отношение $\sim$ на X, в котором две точки эквивалентны, если они могут быть соединены путем, является отношением эквивалентности.

Доказательство. Очевидно. ■

Определение. Классы эквивалентности по только что введенному отношению называются *компонентами линейной связности*.