

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Конспект курса «Наглядная геометрия и топология»

Автор курса: профессор, д.ф.-м.н. Ведюшкина Виктория Викторовна

Автор конспекта: [Цыбулин Егор](#), студент 108 группы

Москва, 19 февраля 2025 г.

Содержание

1	Топологические пространства	2
1.1	Основные понятия	2
1.2	Непрерывность	3
1.3	Способы задания топологии	3
1.4	Гомеоморфизм	4
1.5	Связность	4
1.6	Линейная связность	5
1.7	Компактность	5
1.8	Хаусдорфовость	6

1 Топологические пространства

1.1 Основные понятия

Определение 1.1. *Метрика* — это функция $\rho(x, y) \rightarrow \mathbb{R}$, которая обладает следующими свойствами:

1. $\rho(x, y) \geq 0$, $\rho(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$;
2. $\rho(x, y) = \rho(y, x)$;
3. $\rho(x, z) + \rho(z, y) \geq \rho(x, y)$.

Определение 1.2. Множество X называется *метрическим пространством*, если на нём задана метрика $\rho(x, y) : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$.

Определение 1.3. ε -*окрестность точки* x_0 — это множество всех точек $x \in X : \rho(x, x_0) < \varepsilon$.

Из курса математического анализа.

Определение 1.4. Точка $x \in X \subset \mathbb{R}$ называется *внутренней точкой* множества X , если $\exists B_\varepsilon(x) \subset X$.

Определение 1.5. Множество называется *открытым*, если все его точки — внутренние.

Определение 1.6. Множество A называется *закрытым*, если его дополнение $\mathbb{R} \setminus A$ открыто.

Свойства открытых множеств:

1. Пустое множество и само множество X открыты;
2. Любые объединения открытых множеств открыты;
3. Конечное пересечение открытых множеств открыто.

Определение 1.7. Семейство τ подмножеств некоторого множества X , удовлетворяющее условиям 1-3, называется *топологией*.

Определение 1.8. Пусть X — произвольное множество и $\tau = \{U_\alpha\}$ — некоторое семейство подмножеств множества X . Семейство подмножеств τ называется *топологией*, если оно удовлетворяет следующим условиям:

1. Пустое множество и само множество X принадлежат τ ;
2. Объединение любого семейства множеств из τ принадлежит τ ;
3. Пересечение любого конечного семейства множеств из τ также принадлежит τ .

Определение 1.9. Множество X с фиксированной топологией τ называется *топологическим пространством* и обозначается через (X, τ) .

Если X — метрическое пространство, то на нём можно задать топологию, индуцированную метрикой: множество открыто, если любая точка входит в него с некоторым ε -шаром (некоторой окрестностью).

Пример 1.1. 1. \emptyset, X , других нет — *тривиальная топология*.

2. Семейство τ состоит из всех подмножеств множества X — *дискретная топология*.

Определение 1.10. Множество A топологического пространства X называется *замкнутым*, если его дополнение $X \setminus A$ открыто.

Определение 1.11. Пусть X — топологическое множество, $x_0 \in X$. *Окрестностью точки x_0* назовём любое открытое множество, содержащее эту точку.

Утверждение 1.1. Множество A топологического пространства X открыто $\Leftrightarrow \forall x_0 \in A \exists U_{x_0} \in \tau : x_0 \in U_{x_0} \subset A$

Доказательство. \Rightarrow Пусть A открыто, x_0 — точка A , тогда $U_{x_0} = A$.

\Leftarrow Возьмём $x \in U_x \subset A$, где U_x открыты ($\in \tau$). Рассмотрим $\cup_{x \in A} U_x = U$, где U открыто, т.к. все U_x открыты. При этом $A \subset U$ и $U \subset A \Rightarrow U = A \Rightarrow A$ открыто. \square

1.2 Непрерывность

Определение 1.12. Обратимся к курсу математического анализа. Пусть D_f — область определения $f(x)$, $x_0 \in D_f$. Если

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0, \forall x \in B_{\delta_\varepsilon}(x_0) \cap D_f : |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon,$$

то $f(x)$ называется *непрерывной* в точке x_0 .

$$f : X \rightarrow Y \quad \forall B_\varepsilon(f(x_0)) \exists B_\delta(x_0) : f(B_\delta(x_0)) \subset B_\varepsilon(f(x_0))$$

— в терминах окрестностей.

Определение 1.13. Отображение $f : X \rightarrow Y$ топологии пространств X и Y *непрерывно*, если $\forall x_0 \in X$ и для любой окрестности δ точки $f(x_0)$ существует окрестность точки x_0 такая, что $f(B_\delta(x_0)) \subset B_\delta(f(x_0))$.

Утверждение 1.2. Отображение f двух топологических пространств непрерывно \Leftrightarrow прообраз любого открытого множества открыт.

Доказательство. \Rightarrow $f : X \rightarrow Y$. Пусть $A \subset Y$ открыто. Рассмотрим $f^{-1}(A)$. Пусть $x_0 \in f^{-1}(A) \Rightarrow \exists U$ — открытое: $f(U) \subset A \Rightarrow U \subset f^{-1}(A)$.

\Leftarrow Пусть прообраз любого множества открыт. Пусть $x_0 \in X \Rightarrow f(x_0) \in Y$. Возьмём $V \subset Y$, которое будет открыто. $f(x_0) \in V \Rightarrow f^{-1}(V)$ — открытое множество и $x_0 \in f^{-1}(V) \Rightarrow U := f^{-1}(V)$. \square

1.3 Способы задания топологии

1. Топология на подмножестве:

Пусть X — топологическое пространство. $X_0 \subset X$. $U \in \tau(X) \Rightarrow U \cap X_0 \in \tau(X_0)$.

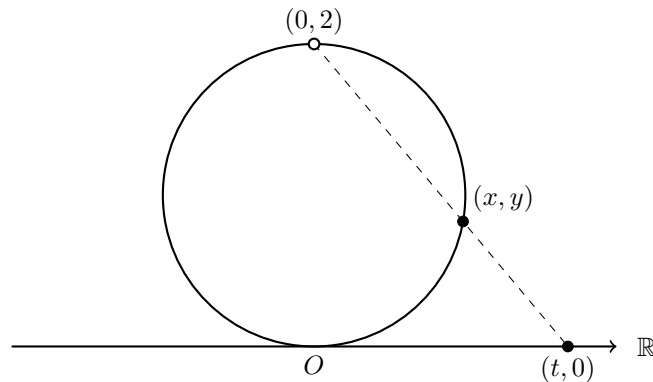
2. $f : X \rightarrow Y$, Y — топологическое пространство, f — произвольное отображение. Тогда открытые множества на X — прообразы открытых на Y .

Замечание 1.1 (Дополнение с лекции №2). Топология на Y порождается отображением f : множество открыто, если его прообраз открыт.

1.4 Гомеоморфизм

Определение 1.14. Топологические пространства X и Y называются *гомеоморфными*, если между ними существует непрерывная биекция $f : X \rightarrow Y$, которая и называется *гомеоморфизмом*, такая, что отображение f^{-1} также непрерывно.

Пример 1.2. Интервал гомеоморфен вещественной прямой \mathbb{R} : можно задать гомеоморфизм между окружностью и прямой, гомеоморфизм между отрезком и прямой строится «растягиванием окружности».



1.5 Связность

Определение 1.15. Топологическое пространство X называется *связным*, если не существует двух открытых непустых непересекающихся множеств A и B таких, что $X = A \cup B$.

Утверждение 1.3. Отрезок вещественной прямой в стандартной топологии связан.

Доказательство. От противного. Пусть отрезок несвязен. $\exists A, B \subset \mathbb{R} : [a, b] = A \cup B, A \cap B = \emptyset$, где A, B — открытые множества. Пусть $\alpha \in A$, тогда $[a, \alpha) \subset A$ (т.к. A открыто). Рассмотрим $\alpha_0 = \sup \alpha : [a, \alpha) \subset A$.

Пусть $\alpha_0 \in A$, тогда:

1. $\alpha_0 = b \Rightarrow B = \emptyset$ — противоречие.
2. $\alpha_0 < b \Rightarrow \alpha_0$ входит в A с окрестностью \Rightarrow существует $(\alpha_0 - \varepsilon, \alpha_0 + \varepsilon) \in A \Rightarrow \alpha_0$ — не супремум — противоречие.

□

Утверждение 1.4. Непрерывный образ связного пространства связан.

Доказательство. $f : X \rightarrow Y$. От противного. Пусть образ несвязен. Тогда $Im f = A \cup B$, где A, B — открытые и непустые множества, $A \cap B = \emptyset$. $f^{-1}(A)$ открыто, $f^{-1}(B)$ открыто. Если множества не пересекаются, то и их образы не пересекаются. Так как множества не пусты, то и их образы не пусты. $f^{-1}(A) \cup f^{-1}(B) = X \Rightarrow X$ не связно — противоречие. □

Замечание 1.2. Связность является топологическим инвариантом.

1.6 Линейная связность

Определение 1.16. *Непрерывная кривая (параметрическая)* — непрерывное отображение ненулевого отрезка в топологическое пространство. $\gamma : [a, b] \rightarrow X$, где γ непрерывна.

$$\gamma : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ \begin{cases} x = \cos t, \\ y = \sin t, \\ t \in [0, 2\pi]. \end{cases}$$

Определение 1.17. Топологическое пространство называется *линейно связным*, если любые две его точки можно соединить кривой.

x, y — точки X , тогда $\exists \gamma : [\alpha, \beta] \rightarrow X : \gamma(\alpha) = x, \gamma(\beta) = y$

Утверждение 1.5. *Образ линейно связного пространства линейно связан.*

Доказательство. Композиция непрерывных отображений непрерывна: $\gamma : [\alpha, \beta] \rightarrow X, f : X \rightarrow Y$. \square

Утверждение 1.6. *Если топологическое пространство линейно связно, то оно связно. (Наоборот, вообще говоря, неверно — как задачу можно попросить привести контрпример).*

Доказательство. Пусть топологическое пространство линейно связно, но не связно. Тогда $X = A \cup B$. Возьмём $x \in A, y \in B$. Пользуемся линейной связностью: $\gamma : [0, 1] \rightarrow X$, γ непрерывна, $\gamma(0) = A, \gamma(1) = B$, $Im\gamma$ в X — связно. $Im\gamma \cap A$ — открыто в топологии образа $Im\gamma$, индуцированного топологии на X (пользуемся топологией на подмножестве), $Im\gamma \cap B$ — открыто в топологии образа $Im\gamma$, индуцированного топологии на X — получили противоречие с тем, что отрезок несвязен. \square

1.7 Компактность

Определение 1.18. Топологическое пространство *компактно*, если из его любого открытого покрытия можно выбрать конечное подпокрытие.

Утверждение 1.7. *Непрерывный образ компакта является компактом.*

Доказательство. Пусть $f : X \rightarrow Y$. Покрываем образ: $Imf \subseteq \bigcup_{\alpha} U_{\alpha}$ — покрытие. $X \subset \bigcup_{\alpha} f^{-1}(U_{\alpha})$ — открытое покрытие X (т.к. f непрерывно). $X \subset \bigcup_{i=1}^n f^{-1}(U_i)$ — конечное подпокрытие. Пользуемся компактностью X : $Imf \subset \bigcup_{i=1}^n f(U_i)$ \square

Замечание 1.3. Компактность является топологическим инвариантом.

Утверждение 1.8. *Замкнутое подмножество компакта есть компакт.*

Доказательство. $M \subset X \subset Y$, M замкнуто, X компактно, Y — топологическое пространство. $M \subset \bigcup_{\alpha} U_{\alpha}$ открытое покрытие M . $(Y \setminus M) \cup \bigcup_{\alpha} U_{\alpha}$ — открытое покрытие. Выберем в нём конечное подпокрытие: $X \subset (Y \setminus M) \cup \bigcup_{i=1}^n U_i$ — конечное подпокрытие. $M \subset \bigcup_{i=1}^n U_i$. \square

1.8 Хаусдорфовость

Определение 1.19. Топологическое пространство X называется *хаусдорфовым*, если у любых двух его различных точек существуют непересекающиеся окрестности.

$\tau = X, \emptyset \Rightarrow X$ не хаусдорфово.

Лемма 1.1. Компакт в хаусдорфовом пространстве является замкнутым множеством.

Доказательство. $M \subset X$, M — компакт. $x_0 \in X \setminus M$, $y \in M$. Пользуемся хаусдорфовостью: $x_0 \in U_{x_0}^y$, $y \in V_y$, $U_{x_0}^y \cap V_y = \emptyset$. $\bigcup_{y \in M} V_y$ — открытое покрытие всего множества M . Пользуемся компактностью: выберем конечное подпокрытие $M \subset \bigcup_{i=1}^n V_{y_i}$, $y_i \in M$. $\bigcap_{i=1}^n U_{x_0}^{y_i} = U$, $x_0 \in U$, $U \cap V_{y_i} = \emptyset$, U открытое $\Rightarrow X \setminus M$ открыто. \square

Утверждение 1.9. $f : X \rightarrow Y$, f — непрерывная биекция, X — компакт, Y — хаусдорфово топологическое пространство $\Rightarrow f$ — гомеоморфизм.

Доказательство. $f : X \rightarrow Y$, X замкнуто, $M \subset X$, M замкнуто $\Rightarrow M$ компактно $\Rightarrow f(M) \subset Y$, где $f(M)$ тоже компактно (т.к. f непрерывно) $\Rightarrow f(M)$ замкнуто в Y . \square

Фактор-топология: дано топологическое пространство X , и на нём задано отношение эквивалентности: $f : X \rightarrow X/\sim$. f сопоставляет каждой точке из X её класс эквивалентности. Топология X/\sim задаётся отображением f .

Важный пример не забудь добавить.

Список литературы

- [1] А.А. Ошемков. [Наглядная геометрия и топология. Лекции](#). Москва: teach in, электронное издание. 185 с.
- [2] Учебные материалы по наглядной геометрии и топологии от кафедры дифференциальной геометрии и приложений механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [Электронный ресурс]. URL: <http://dfgm.math.msu.su/ngit.php> (дата обращения: 19.02.2025).