

# Методы оптимизации. Семинар 6. Выпуклые функции.

Корнилов Никита Максимович

Московский физико-технический институт

9 октября 2025г

## Definition

Пусть  $U$  - линейное пространство, и  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  - функция, принимающая значения на всем  $U$  во множестве расширенных вещественных чисел  $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{+\infty\} \cup \{-\infty\}$ . Будем называть эффективной областью определения функции  $f$  множество всех точек, в которых функция принимает конечные значения:

$$\text{dom } f = \{x \in U : |f(x)| < +\infty\}$$

Операции с бесконечностями:

- ①  $\forall \alpha \in \mathbb{R} : \quad -\infty < \alpha < +\infty,$
- ②  $\forall \alpha \in \mathbb{R} : \quad \alpha + \infty = +\infty, \quad \alpha - \infty = -\infty,$
- ③  $\forall \alpha > 0 \in \mathbb{R} : \quad \pm \alpha \cdot (+\infty) = \pm \infty, \quad \pm \alpha \cdot (-\infty) = \mp \infty.$

Если функция задана только на области определения  $Q \subset U$ , то удобно доопределить её за пределами  $Q$  на всем  $U$ , считая, что там функция принимает значение  $+\infty$ .

## Definition (Выпуклые функции)

Пусть  $U$  - линейное пространство. Функция  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  называется *выпуклой*, если для любых  $x, y \in U$  и любого  $\alpha \in [0, 1]$  выполняется

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y). \quad (1)$$

## Definition (Выпуклые функции)

Пусть  $U$  - линейное пространство. Функция  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  называется *выпуклой*, если для любых  $x, y \in U$  и любого  $\alpha \in [0, 1]$  выполняется

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y). \quad (1)$$

Если неравенство (1) выполняется как строгое для всех  $x \neq y$  и  $\alpha \in (0, 1)$ , то функция  $f$  называется *строго выпуклой* функцией.

## Definition (Выпуклые функции)

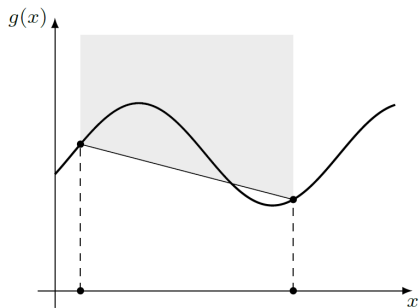
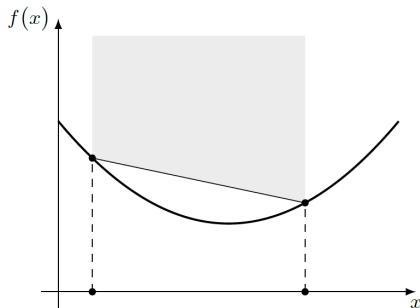
Пусть  $U$  - линейное пространство. Функция  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  называется *выпуклой*, если для любых  $x, y \in U$  и любого  $\alpha \in [0, 1]$  выполняется

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y). \quad (1)$$

Если неравенство (1) выполняется как строгое для всех  $x \neq y$  и  $\alpha \in (0, 1)$ , то функция  $f$  называется *строго выпуклой* функцией.

- Выпуклая функция может принимать только одно расширенное значение -  $+\infty$  (или быть  $f \equiv -\infty$ ). Поэтому введём определение *собственной функции*:  $f(x) > -\infty, \forall x \in U$ .
- $\forall x, y \in \text{dom } f$  значение выпуклой функции  $f$  в любой точке отрезка  $[x, y]$  должно быть конечным. Поэтому у выпуклых функций  $\text{dom } f$  — выпуклое множество.

# Примеры функций



## Definition

Пусть  $U$  — линейное пространство. Функция  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  называется **вогнутой**, если для любых  $x, y \in U$  и любого  $\alpha \in [0, 1]$  выполняется

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \geq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y). \quad (2)$$

Если это неравенство (2) выполняется как строгое для всех  $x \neq y$  и  $\alpha \in (0, 1)$ , то функция  $f$  называется *строго вогнутой*.

- Функция  $f$  является (строго) выпуклой тогда и только тогда, когда функция  $-f$  является (строго) вогнутой.
- У вогнутой функции  $\text{dom } f$  все также выпуклое множество.
- Вогнутая функция может принимать только значение  $-\infty$  (или быть  $f \equiv +\infty$ .)

# Докажем по определению

## Example (Аффинная функция)

Пусть в пространстве  $U$  задано (произвольное) скалярное произведение и  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  - аффинная функция

$$f(x) = \langle a, x \rangle + b,$$

где  $a \in U$  и  $b \in \mathbb{R}$ . Проверьте  $f$  на выпуклость/вогнутость.

## Example (Норма)

Пусть в пространстве  $U$  задана (произвольная) норма  $\|\cdot\|$ . Функция  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  задана формулой

$$f(x) = \|x\|.$$

Проверьте  $f$  на выпуклость/вогнутость.



# Пример расширеннозначной выпуклой функции

## Example

Функция индикатор множества  $Q \subset U$ :

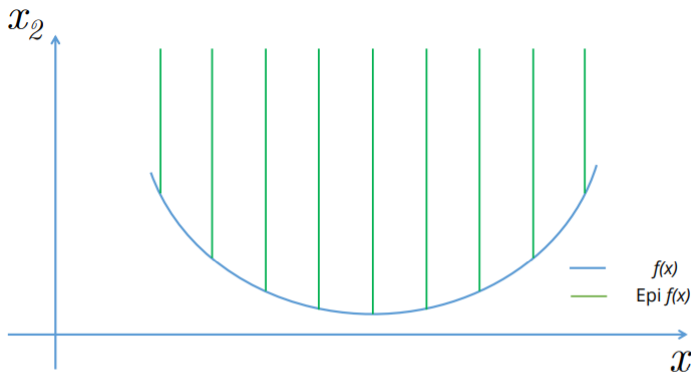
$$I_Q(x) = \begin{cases} 0, & x \in Q, \\ +\infty, & x \notin Q. \end{cases}$$

Для выпуклых множеств  $Q$  функция  $I_Q$  выпуклая.

## Definition

Пусть  $U$  - линейное пространство. Надграфиком (или эпиграфом) функции  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  называется множество

$$\text{Epi } f := \{(x, t) \in U \times \overline{\mathbb{R}} : f(x) \leq t\}.$$

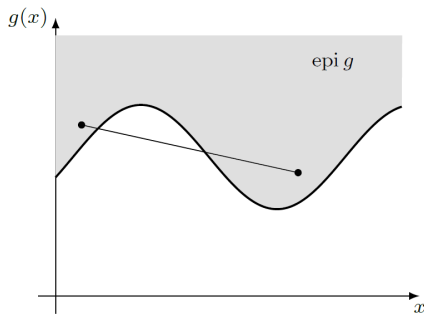
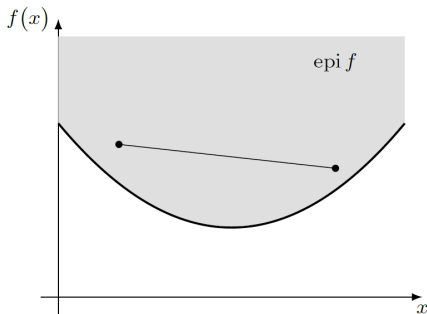


# Альтернативное определение выпуклости

Следующее утверждение можно считать альтернативным определением выпуклости функции.

## Theorem

Пусть  $U$  — линейное пространство. Функция  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  является выпуклой тогда и только тогда, когда её надграфик  $\text{Epi } f$  является выпуклым множеством в пространстве  $U \times \overline{\mathbb{R}}$ .



# Критерий выпуклости первого порядка

## Theorem (Критерий выпуклости 1-го порядка)

Пусть  $\text{dom } f$  является открытым множеством и собственная функция  $f$  дифференцируема всюду на  $\text{dom } f$ . Функция  $f$  является выпуклой тогда и только тогда, когда  $\text{dom } f$  является выпуклым множеством и

$$f(x) \geq f(y) + \langle \nabla f(y), x - y \rangle, \quad x, y \in \text{dom } f. \quad (3)$$

## Example

Проверьте критерий на функции  $f(x) = \sum_{i=1}^d \frac{1}{x_i}, x \in \mathbb{R}^n$  с  $\text{dom } f = \mathbb{R}_{++}^n$ .

## Example

Проверьте критерий на функции  $f(x) = \|x\|_2, x \in \mathbb{R}^n$ .

# Критерий выпуклости первого порядка

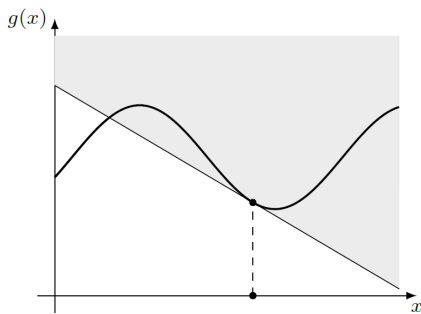
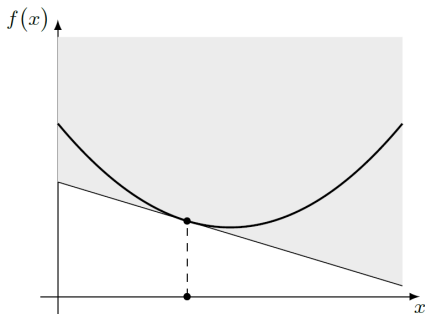


График функции  $f(x)$  лежит выше касательной  $f(y) + \langle \nabla f(y), x - y \rangle$  в любой точке  $\text{dom } f$ .

## Theorem (Дифференциальное условие оптимальности для выпуклой функции)

*Пусть  $f$  — собственная выпуклая функция,  $\text{dom } f$  является открытым множеством, на котором  $f$  дифференцируемая, и  $x^* \in \text{dom } f$ . Тогда  $x^*$  является глобальным минимумом функции  $f$ , если и только если  $\nabla f(x^*) = 0$ . Другими словами любая стационарная точка автоматически является глобальным минимумом функции  $f$ .*

# Критерий выпуклости второго порядка

## Theorem (Критерий выпуклости 2-го порядка)

Пусть  $\text{dom } f$  является открытым множеством и собственная функция  $f$  дважды дифференцируема на  $\text{dom } f$ . Функция  $f$  является выпуклой тогда и только тогда, когда  $\text{dom } f$  является выпуклым множеством и

$$d^2f(x)[h, h] \geq 0, \quad \forall x, h \in \text{dom } f.$$

В случае  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  условие имеет вид

$$\nabla^2 f(x) \succeq 0 \Leftrightarrow \lambda_{\min}(\nabla^2 f(x)) \geq 0, \quad \forall x \in \text{dom } f.$$

## Example

- $f(x) = \exp(ax)$  выпукла для любого  $a \in \mathbb{R}$ ,
- $f(x) = -\ln x$  выпукла с  $\text{dom } f = \mathbb{R}_{++}$ ,
- $f(x) = x \ln x$  выпукла с  $\text{dom } f = \mathbb{R}_+$ ,
- $f(x) = -\sqrt{x}$  выпукла с  $\text{dom } f = \mathbb{R}_{++}$
- $f(x) = x^p$  для  $p \geq 1$  или  $p \leq 0$  выпукла с  $\text{dom } f = \mathbb{R}_{++}$  и вогнута для  $0 \leq p \leq 1$ .



## Example

Пусть  $A \in \mathbb{S}^n$ ,  $b \in \mathbb{R}^n$ . Рассмотрим квадратичную функцию

$$f(x) = \frac{1}{2} \langle Ax, x \rangle - \langle b, x \rangle.$$

Она является выпуклой в том и только в том случае, когда  $A \succeq 0$ .

## Example

В частности, в  $\mathbb{R}^2$  рассмотрим матрицу  $A = \begin{pmatrix} a & c \\ c & b \end{pmatrix}$ .

# Докажем по критериям

## Example

Функция

$$f(X) = -\ln \det(X)$$

является выпуклой на  $\mathbb{S}_{++}^n$ .

## Example

Функция

$$f(x) = \ln(e^{x_1} + e^{x_2} + \dots + e^{x_n})$$

является выпуклой на  $\mathbb{R}^n$ .

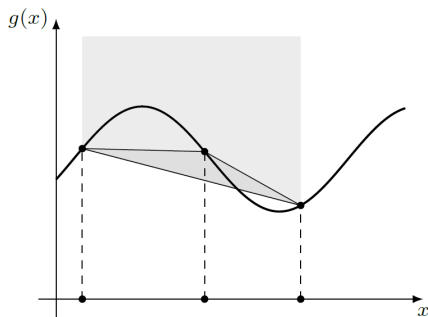
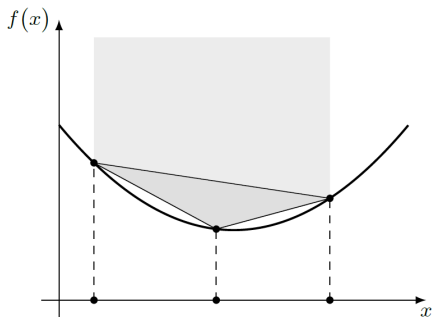
## Theorem

Пусть  $f(x) : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  — выпуклая функция. Пусть также  $x_1, \dots, x_k$  — точки из  $U$  и коэффициенты  $\alpha_1, \dots, \alpha_k$  таковы, что  $\alpha_i \geq 0$  и  $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$ . Тогда справедливо следующее неравенство:

$$f\left(\sum_{i=1}^k \alpha_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^k \alpha_i f(x_i). \quad (4)$$

Причем равенство достигается тогда и только тогда, когда функция  $f$  является аффинной или когда все точки  $x_i$  совпадают.

# Иллюстрация



① Для вектора чисел  $x \in \mathbb{R}_{++}^n$  верно

$$\frac{x_1 + \cdots + x_n}{n} \geq \sqrt[n]{x_1 \cdots x_n}.$$

- ① Для вектора чисел  $x \in \mathbb{R}_{++}^n$  верно

$$\frac{x_1 + \cdots + x_n}{n} \geq \sqrt[n]{x_1 \cdots x_n}.$$

- ② Неравенство Гельдера в частности Коши-Буняковского:  
Для векторов  $x, y \in \mathbb{R}^d$  и чисел  $p \geq 1$ ,  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$  выполняется неравенство

$$\langle x, y \rangle \leq |\langle x, y \rangle| \leq \|x\|_p \|y\|_q. \quad (5)$$

- ❶ Для вектора чисел  $x \in \mathbb{R}_{++}^n$  верно

$$\frac{x_1 + \cdots + x_n}{n} \geq \sqrt[n]{x_1 \cdots x_n}.$$

- ❷ Неравенство Гельдера в частности Коши-Буняковского:  
Для векторов  $x, y \in \mathbb{R}^d$  и чисел  $p \geq 1, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$  выполняется неравенство

$$\langle x, y \rangle \leq |\langle x, y \rangle| \leq \|x\|_p \|y\|_q. \quad (5)$$

- ❸ Для выпуклой функции  $f$  и случайной величины  $X$  верно,

$$f(\mathbb{E}[X]) \leq \mathbb{E}[f(X)].$$

# Операции, сохраняющие выпуклость

- Неотрицательная взвешенная сумма

## Proposition

Пусть функции  $f_1, \dots, f_m$  выпуклы,  $c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R}_+$  Тогда функция

$$f(x) = \sum_{i=1}^k c_i f_i(x)$$

является выпуклой.



# Операции, сохраняющие выпуклость

- Неотрицательная взвешенная сумма

## Proposition

Пусть функции  $f_1, \dots, f_m$  выпуклы,  $c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R}_+$  Тогда функция

$$f(x) = \sum_{i=1}^k c_i f_i(x)$$

является выпуклой.

- Аффинная подстановка аргумента

## Proposition

Пусть  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  - выпуклая функция,  $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ , и  $b \in \mathbb{R}^n$ . Тогда

$$g(x) = f(Ax + b)$$

выпуклая с областью определения  $\text{dom } g = \{x \mid Ax + b \in \text{dom } f\}$ .

## Example

Пусть  $a, b \in \mathbb{R}^k$  и  $c \in \mathbb{R}_+^k$ . Функция

$$f(x) = \sum_{i=1}^k c_i \exp(\langle a_i, x \rangle + b_i)$$

является выпуклой.

# Поточечный максимум

Пересекая выпуклые эпиграфы двух выпуклых функций  $f_1$  и  $f_2$ , приходим к новому выпуклому множеству, которое является эпиграфом функции

$$f(x) = \max \{f_1(x), f_2(x)\}.$$

Пересекая произвольное число выпуклых множеств, мы опять получаем выпуклое множество.

## Theorem

*Если функция двух аргументов  $g(x, y)$  выпукла по  $x$  для любого  $y \in Y$ , то следующая функция*

$$f(x) = \sup_{y \in Y} g(x, y)$$

*так же выпукла по  $x$ .*

# Примеры на максимум

## Example

Кусочно-линейная функция

$$f(x) = \max \left\{ a_1^\top x + b_1, \dots, a_m^\top x + b_m \right\},$$

где  $a_i \in \mathbb{R}^n$ ,  $b_i \in \mathbb{R}$ ,  $1 \leq i \leq m$ , выпукла на  $\mathbb{R}^n$ .

## Example (Сумма $r$ максимальных координат)

Обозначим  $i$ -ю максимальную координату вектора  $x \in \mathbb{R}^n$  через  $x_{[i]}$ , т.е.

$$x_{[1]} \geq x_{[2]} \geq \dots \geq x_{[n]}$$

Тогда функция

$$f(x) = \sum_{i=1}^r x_{[i]},$$

то есть сумма  $r$  максимальных координат, есть выпуклая функция.

## Example (Расстояние до наиболее удаленной точки множества)

Пусть  $C \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $\|\cdot\|$  - произвольная норма. Тогда расстояние от точки  $x$  до наиболее удаленной точки множества  $C$

$$f(x) = \sup_{y \in C} \|x - y\|,$$

— выпуклая функция.

## Example (Наибольшее собственное число)

Пусть  $X$  — симметрическая матрица. Тогда

$$f(X) = \lambda_{\max}(X)$$

является выпуклой.

## Proposition

Пусть даны функция  $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  и набор функций  $f_i : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  для  $i \in \overline{1, n}$ . Тогда функция  $g(x) = h(f_1(x), \dots, f_n(x)) : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  — выпуклая функция, если  $h$  — выпуклая функция, и для каждого индекса  $i$

- либо  $h$  - неубывающая функция  $i$ -го аргумента и  $f_i$  выпуклая,
- либо  $h$  - невозрастающая функция  $i$ -го аргумента и  $f_i$  вогнутая
- либо  $f_i$  - аффинная.

## Example

Пусть  $f(x)$  выпукла на  $\mathbb{R}^n$ . Тогда функция

$$g(x) = e^{f(x)}$$

является выпуклой на  $\mathbb{R}^n$ .

## Example

Пусть  $\|\cdot\|$  — произвольная норма. Тогда функция

$$g(x) = \|x\|^p$$

является выпуклой на  $\mathbb{R}^n$  при  $p \geq 1$ .

# Алгоритм проверки на выпуклость

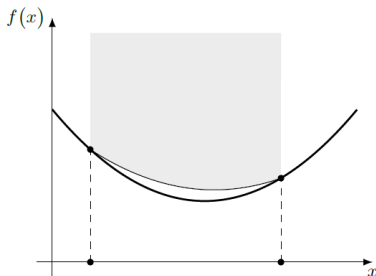
- 1 Для самых простых функций: попробовать воспользоваться определением или выпуклость эпиграфа.
- 2 Посчитать второй дифференциал и проверить, что он положительно определен  $d^2f(x)[h, h] \geq 0, \forall x, h$ . Если функция  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ , то можно проверить гессиан на  $\nabla^2 f(x) \succeq 0, \forall x \in \mathbb{R}^n$  или же эквивалентно  $\lambda_{\min}(\nabla^2 f(x)) \geq 0, \forall x \in \mathbb{R}^n$ .
- 3 Если считать второй дифференциал сложно или невозможно, можно проверить операции, сохраняющие выпуклость: аффинная подстановка, максимум, положительная сумма, неубывающие суперпозиция. Особенно полезно целевая функция состоит из максимумов или комбинаций простых выпуклых функций.



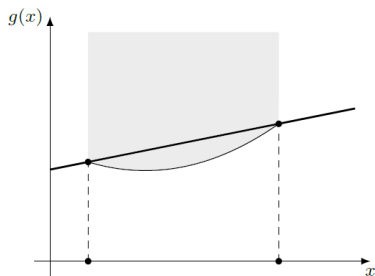
## Definition

Функция  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  называется  $\mu$ -сильно выпуклой, если для любых  $x, y \in U$  и  $\alpha \in [0, 1]$  выполнено

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) - \alpha(1 - \alpha)\frac{\mu}{2}\langle x - y, x - y \rangle.$$



(а)  $\mu$ -сильно выпуклая парабола.



(b) Не сильно выпуклая прямая.

## Theorem

Пусть  $\text{dom } f$  является открытым множеством и собственная функция  $f$  дифференцируема всюду на  $\text{dom } f$ . Функция  $f$  является  $\mu$ -сильно выпуклой тогда и только тогда, когда  $\text{dom } f$  является выпуклым множеством и

$$f(x) \geq f(y) + \langle \nabla f(y), x - y \rangle + \frac{\mu}{2} \langle x - y, x - y \rangle, \quad x, y \in \text{dom } f.$$

## Theorem

Пусть  $\text{dom } f$  является открытым множеством и собственная функция  $f$  дважды дифференцируема на  $\text{dom } f$ . Функция  $f$  является  $\mu$ -сильно выпуклой тогда и только тогда, когда  $\text{dom } f$  является выпуклым множеством и

$$d^2f(x)[h, h] \geq \mu \langle h, h \rangle, \quad \forall x, h \in \text{dom } f.$$

В случае  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  условие имеет вид

$$\nabla^2 f(x) \succeq \mu I \Leftrightarrow \lambda_{\min}(\nabla^2 f(x)) \geq \mu, \quad \forall x \in \text{dom } f.$$

# Алгоритм поиска константы сильной выпуклости

- 1 Посчитать второй дифференциал и найти наибольшую константу  $\mu \geq 0$ , для которой  $d^2f(x)[h, h] \geq \mu \langle h, h \rangle, \forall x, h$ . Можно искать через инфимум  $\mu = \inf_{x, h \neq 0} \frac{d^2f(x)[h, h]}{\langle h, h \rangle}$ .

Если функция  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ , то можно поверить гессиан на  $\nabla^2 f(x) - \mu I \succeq 0 \Leftrightarrow \lambda_{\min}(\nabla^2 f(x)) \geq \mu, \forall x \in \mathbb{R}^n$  или же через инфимум  $\mu = \inf_x \lambda_{\min}(\nabla^2 f(x))$ .

- 2 Заметьте, что операции, сохраняющие выпуклость, могут НЕ сохранять константы сильной выпуклости. Например, сумма  $\mu_1$  и  $\mu_2$ -сильно выпуклых функций не  $\mu_1 + \mu_2$  сильно выпуклая, это оценка снизу.

## Definition

Пусть дана непрерывно дифференцируемая функция  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ . Будем говорить, что данная функция имеет  $L$ -Липшицев градиент (или является  $L$ -гладкой), если для любых  $x, y \in U$  выполнено

$$\|\nabla f(x) - \nabla f(y)\| \leq L\|x - y\|,$$

где норма  $\|\cdot\|$  индуцирована скалярным произведением.

## Theorem

*Непрерывно дифференцируемая функция  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  является  $L$ -гладкой равносильно тому, что для любых  $x, y \in U$  выполнено*

$$|f(x) - f(y) - \langle \nabla f(y), x - y \rangle| \leq \frac{L}{2} \langle x - y, x - y \rangle.$$

# Критерии гладкости второго порядка

## Theorem

Дважды непрерывно дифференцируемая функция  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  является  $L$ -гладкой равносильно тому, что

$$-L\langle h, h \rangle \leq d^2f(x)[h, h] \leq L\langle h, h \rangle, \quad \forall x, h \in U.$$

В случае  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  условие имеет вид

$$-L \cdot I \preceq \nabla^2 f(x) \preceq L \cdot I, \forall x \in \mathbb{R}^n \Leftrightarrow |\lambda_i(\nabla^2 f(x))| \leq L, i \in \overline{1, n}, \forall x \in \mathbb{R}^n.$$

Нужно искать наименьшую константу  $L > 0$ , которая удовлетворяет этим условиям. Или же через супремум

$$L = \sup_{x, h \neq 0} \frac{|d^2f(x)[h, h]|}{\langle h, h \rangle} = \sup_x |\lambda_i(\nabla^2 f(x))|.$$

# Выпуклые и гладкие функции

Непрерывно дифференцируемая функция  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  является  $\mu$ -сильно выпуклой и  $L$ -гладкой:

$$\frac{\mu}{2} \|x - y\|^2 \leq f(x) - f(y) - \langle \nabla f(y), x - y \rangle \leq \frac{L}{2} \|x - y\|_2^2, \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^n,$$

или эквивалентное утверждение для дважды непрерывно дифференцируемой функции

$$\mu I \preceq \nabla^2 f(x) \preceq LI, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n,$$

или же через спектр

$$\mu \leq \lambda_i(\nabla^2 f(x)) \leq L, \quad i \in \overline{1, n}, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n,$$

$$\mu = \inf_x \lambda_{\min}(\nabla^2 f(x)), \quad L = \sup_x \lambda_{\max}(\nabla^2 f(x)).$$

# Иллюстрация

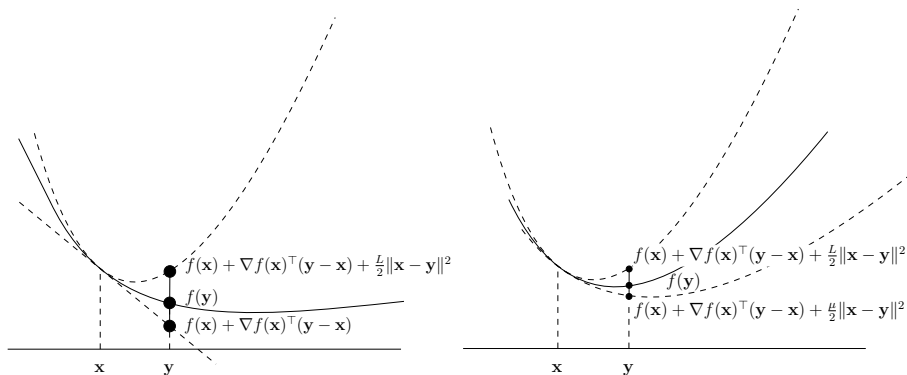


Рис.: Иллюстрация понятий  $L$ -гладкости и  $(\mu$ -сильной) выпуклости



# Выпуклость линий уровней

## Definition

Для функции  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  множество  $\mathfrak{L}_\beta$ , определенное скаляром  $\beta \in \mathbb{R}$ :

$$\mathfrak{L}_\beta = \{x \in U : f(x) \leq \beta\}$$

называется множеством подуровня  $\beta$  функции  $f(x)$ .

## Proposition

Пусть  $U$  — линейное пространство и  $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  выпуклая функция. Тогда  $\forall \beta \in \mathbb{R}$  множество подуровня  $\mathfrak{L}_\beta$  выпукло.

Верное ли обратное?

# Линии уровня

