

# **Математический анализ III**

Конспект *основан* на лекциях Константина Петровича Кохася

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Многомерный анализ</b>	<b>2</b>
1.1	Сведения из линейной алгебры . . . . .	2
1.2	Дифференцируемость и дифференциал отображений . . . . .	6
1.3	Теоремы Лагранжа для отображений . . . . .	12
1.4	Формула Тейлора . . . . .	13
1.5	Диффеоморфизмы . . . . .	17
1.6	Относительный экстремум . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Функциональные последовательности и ряды</b>	<b>21</b>
2.1	Поточечная и равномерная сходимости последовательностей функций	21
2.2	Теоремы о равномерно сходящихся функциональных последовательностях . . . . .	24
2.3	Равномерная сходимость функциональных рядов . . . . .	27

# Глава 1

## Многомерный анализ

### 1.1 Сведения из линейной алгебры

**Определение.**  $L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$  — пространство линейных отображений из  $\mathbb{R}^m$  в  $\mathbb{R}^n$

**Определение.** Элементы  $L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$  называются операторами

**Определение.** Нормой на множестве  $X$  называется отображение  $\| \cdot \| : X \rightarrow \mathbb{R}$ , удовлетворяющее свойствам

i)  $\|x\| \geq 0, \|x\| = 0 \iff x = 0$

ii)  $\|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|$

iii)  $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$

**Определение.** Нормированным пространством называется пара  $\langle X, \| \cdot \| \rangle$

**Замечание.** Отображение, задаваемое формулой  $d(x, y) = \|x - y\|$  является метрикой. Поэтому все нормированные пространства сразу можно считать и метрическими.

**Теорема 1.1.1.** (Об эквивалентности норм в конечномерных пространствах)

Пусть  $V$  — конечномерное линейное пространство, а  $\| \cdot \|_1$  и  $\| \cdot \|_2$  — нормы на  $V$ . Тогда

$$\exists c, C > 0: c \|x\|_1 \leq \|x\|_2 \leq C \|x\|_1$$

**Доказательство.** Пусть  $\|x\| = \|c_1 e_1 + c_2 e_2 + \dots + c_n e_n\| \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2}$ .

i)  $\| \cdot \|$  — норма.

·  $\sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2} \geq 0$  — очевидно

·  $\sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha c_i)^2} = |\alpha| \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2}$  — очевидно

$$\cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i + b_i)^2} \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2} \text{ — неравенство Минковского}$$

ii) Проверим теперь, что все нормы на  $V$  эквивалентны  $\| \cdot \|$ .

$$\|x_1 e_1 + \dots + x_n e_n\|_1 \leq \sum_{i=1}^n \|x_i e_i\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i| \|e_i\|_1 \leq_{\text{КБШ}} \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \|e_i\|_1^2} = c \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}$$

тогда

$$| \|x\|_1 - \|y\|_1 | \leq \|x - y\|_1 \leq c \|x - y\|$$

Поэтому  $\| \cdot \|_1$  — непрерывное отображение  $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ . Раз так, найдем максимум и минимум этого отображения на сфере (компакт, поэтому максимум и минимум реализуются). Пусть

$$c_1 := \min_{x \in S^n} \|x\|_1$$

$$c_2 := \max_{x \in S^n} \|x\|_1$$

Ни  $c_1$ , ни  $c_2$  не равны нулю (потому что норма равна нулю только на нулевом векторе, который сфере не принадлежит). Тогда

$$\|x\|_1 = \left\| \frac{x}{\|x\|} \right\|_1 \|x\| \geq c_1 \|x\|$$

$$\|x\|_1 = \left\| \frac{x}{\|x\|} \right\|_1 \|x\| \leq c_2 \|x\|$$

что и доказывает утверждение теоремы. ■

**Определение.** Нормой оператора называется отображение  $\| \cdot \| : L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n) \rightarrow \mathbb{R}$

$$\|A\| \stackrel{\text{def}}{=} \sup_{x \in S^m} \|Ax\|_{\mathbb{R}^n}$$

**Замечание.**  $\sup_{\|x\|=1} Ax = \sup_{\|x\| \leq 1} Ax$

**Теорема 1.1.2.** (Пространство линейных операторов)  
 $\| \cdot \| : L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n) \rightarrow \mathbb{R}$  — действительно норма.

*Доказательство.*

$$\|A(x_1 e_1 + \dots + x_n e_n)\| \leq \sum_{i=1}^n |x_i| \|Ae_i\| \leq_{\text{КБШ}} \|x\| \sum_{i=1}^n \|Ae_i\|$$

Поэтому супремум конечен для всех элементов  $L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ , то есть отображение определено корректно. Проверим свойства нормы:

i)  $\|A\| = 0 \iff \forall x \in S^n Ax = 0 \iff A = 0$ . Неотрицательность очевидна.

$$\text{ii) } \|\alpha \mathcal{A}\| = \sup_{\mathbf{x} \in S^n} \|\alpha \mathcal{A} \mathbf{x}\| = \sup_{\mathbf{x} \in S^n} |\alpha| \|\mathcal{A} \mathbf{x}\| = \alpha \|\mathcal{A}\|$$

$$\text{iii) } \|\mathcal{A} + \mathcal{B}\| = \sup_{\mathbf{x} \in S^n} \|\mathcal{A} \mathbf{x} + \mathcal{B} \mathbf{x}\| \leq \sup_{\mathbf{x} \in S^n} \|\mathcal{A} \mathbf{x}\| + \sup_{\mathbf{x} \in S^n} \|\mathcal{B} \mathbf{x}\|$$

■

**Теорема 1.1.3.** (Липшицевость линейных операторов)

$\mathcal{A} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n) \implies \mathcal{A}$  — липшицево

*Доказательство.*

$$\|\mathcal{A} \mathbf{x} - \mathcal{A} \mathbf{y}\| = \|\mathcal{A}(\mathbf{x} - \mathbf{y})\| = \left\| \mathcal{A} \left( \frac{\mathbf{x} - \mathbf{y}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|} \right) \right\| \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| \leq \|\mathcal{A}\| \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|$$

■

**Теорема 1.1.4.** (О произведении линейных операторов)

$\mathcal{A} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ ,  $\mathcal{B} \in L(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^l)$ , тогда  $\mathcal{B}\mathcal{A} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^l)$ , причем  $\|\mathcal{B}\mathcal{A}\| \leq \|\mathcal{B}\| \|\mathcal{A}\|$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} \|\mathcal{B}\mathcal{A}\| &= \sup_{\mathbf{x} \in S^n} \|\mathcal{B}(\mathcal{A} \mathbf{x})\| \\ &= \sup_{\mathbf{x} \in S^n} \left( \|\mathcal{A} \mathbf{x}\| \cdot \|\mathcal{B} \left( \frac{\mathcal{A} \mathbf{x}}{\|\mathcal{A} \mathbf{x}\|} \right)\| \right) \\ &\leq \sup_{\mathbf{x} \in S^n} \|\mathcal{A} \mathbf{x}\| \cdot \sup_{\mathbf{x} \in S^n} \left\| \mathcal{B} \left( \frac{\mathcal{A} \mathbf{x}}{\|\mathcal{A} \mathbf{x}\|} \right) \right\| \\ &\leq \|\mathcal{A}\| \|\mathcal{B}\| \end{aligned}$$

■

**Определение.**  $\Omega_m$  — пространство обратимых линейных операторов на  $\mathbb{R}^m$

**Лемма 1.1.5.** (Критерий обратимости линейного оператора)

$\mathcal{A} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$  обратим тогда и только тогда, когда  $m = n$  и  $\text{Ker}(\mathcal{A}) = 0$

*Доказательство.* Линейная алгебра.

■

**Лемма 1.1.6.** (Об условиях, эквивалентных обратимости оператора)

$\mathcal{A} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m)$  обратим  $\iff \exists c > 0 \forall \mathbf{x} \|\mathcal{A} \mathbf{x}\| \geq c \|\mathbf{x}\|$ , причем  $\|\mathcal{A}^{-1}\| \leq \frac{1}{c}$

*Доказательство.*  $\|\mathcal{A} \mathbf{x}\| \geq c \|\mathbf{x}\| \iff \text{Ker}(\mathcal{A}) = 0 \iff \mathcal{A}$  обратим.

$$\|\mathcal{A} \mathbf{x}\| \geq c \|\mathbf{x}\| \iff \|\mathbf{y}\| \geq c \|\mathcal{A}^{-1} \mathbf{y}\| \iff \|\mathcal{A}^{-1} \mathbf{y}\| \leq \frac{1}{c} \|\mathbf{y}\|$$

■

**Теорема 1.1.7.** (Об обратимости оператора, близкого к обратимому)

$\mathcal{A} \in \Omega_m$ ,  $\mathcal{B} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m)$ ,  $\|\mathcal{A} - \mathcal{B}\| < \frac{1}{\|\mathcal{A}^{-1}\|}$ , тогда

i)  $\mathcal{B} \in \Omega_m$

$$\text{ii) } \|\mathcal{B}^{-1}\| \leq \frac{1}{\|\mathcal{A}^{-1}\|^{-1} - \|\mathcal{A} - \mathcal{B}\|}$$

$$\text{iii) } \|\mathcal{A}^{-1} - \mathcal{B}^{-1}\| \leq \frac{\|\mathcal{A}^{-1}\|}{\|\mathcal{A}^{-1}\|^{-1} - \|\mathcal{A} - \mathcal{B}\|} \|\mathcal{A} - \mathcal{B}\|$$

*Доказательство.*

i, ii)

$$\|\mathcal{B}\mathbf{x}\| \geq \|\mathcal{A}\mathbf{x}\| - \|(\mathcal{A} - \mathcal{B})\mathbf{x}\| \geq \left( \frac{1}{\|\mathcal{A}^{-1}\|} - \|\mathcal{A} - \mathcal{B}\| \right) \|\mathbf{x}\|$$

первое неравенство — неравенство треугольника, а второе выполнено потому, что

$$\|\mathbf{x}\| = \|\mathcal{A}\mathcal{A}^{-1}\mathbf{x}\| \leq \|\mathcal{A}\| \|\mathcal{A}^{-1}\mathbf{x}\|$$

Далее по лемме получаем обратимость  $\mathcal{B}$  и оценку на его норму.

iii)

$$\begin{aligned} \mathcal{A}^{-1} - \mathcal{B}^{-1} &= \mathcal{A}^{-1}(\mathcal{B} - \mathcal{A})\mathcal{B}^{-1} \\ \|\mathcal{A}^{-1} - \mathcal{B}^{-1}\| &\leq \|\mathcal{A}^{-1}\| \|\mathcal{B} - \mathcal{A}\| \|\mathcal{B}^{-1}\| \leq_{\text{i)} } \frac{\|\mathcal{A}^{-1}\|}{\|\mathcal{A}^{-1}\|^{-1} - \|\mathcal{A} - \mathcal{B}\|} \|\mathcal{A} - \mathcal{B}\| \end{aligned}$$

■

**Следствие 1.1.8.** Множество  $\Omega_m$  открыто в метрической топологии  $\langle L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m), \|\cdot\| \rangle$

## 1.2 Дифференцируемость и дифференциал отображений

**Определение.** Непустое множество  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^m$  называется *областью*, если оно открыто и связно.

**Определение.** Отображение  $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\Omega$  — область в  $\mathbb{R}^m$  называется *дифференцируемым* в точке  $\mathbf{x} \in \Omega$ , если существуют  $\mathcal{A} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ ,  $r: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ , такие что

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) = f(\mathbf{x}) + \mathcal{A}\mathbf{h} + r(\mathbf{h})$$

Где  $r(\mathbf{h})$  удовлетворяет условию

$$\lim_{\mathbf{h} \rightarrow 0} \frac{\|r(\mathbf{h})\|}{\|\mathbf{h}\|} = 0$$

или, что то же самое

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) = f(\mathbf{x}) + \mathcal{A}\mathbf{h} + \alpha(\mathbf{h}) \|\mathbf{h}\|$$

Где  $\alpha(\mathbf{h})$  бесконечно малое, то есть

$$\lim_{\mathbf{h} \rightarrow 0} \alpha(\mathbf{h}) = 0$$

или, что то же самое

$$\lim_{\mathbf{h} \rightarrow 0} \frac{\|f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - f(\mathbf{x}) - \mathcal{A}\mathbf{h}\|}{\|\mathbf{h}\|} = 0$$

**Замечание.** Функции  $\alpha$ ,  $r$  из определения дифференцируемости зависят не только от  $\mathbf{h}$ , но и от  $\mathbf{x}$ .

**Определение.** Оператор  $\mathcal{A} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$  из определения дифференцируемости будем называть *дифференциалом  $f$  в точке  $\mathbf{x}$*  и обозначать  $d_{\mathbf{x}}f = \mathcal{A}$ .

**Замечание.** Отображение  $\mathbf{x} \mapsto d_{\mathbf{x}}f$ , действующее из  $\mathbb{R}^m$  в  $L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$  называют *дифференциалом  $f$* .

**Определение.** Матрицу, соответствующую производному оператору называют *матрицей Якоби отображения  $f$  в точке  $\mathbf{x}$* .

**Теорема 1.2.1.** (Единственность производной)

$f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$ ,  $f$  дифференцируема в  $\mathbf{x}$ , тогда существует единственный производный оператор  $f$  в точке  $\mathbf{x}$ .

**Доказательство.** Проверим, что для любого  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^m$   $\mathcal{A}\mathbf{z}$  задано однозначно. Пусть  $\mathbf{h} = t\mathbf{z}$  при  $t \in \mathbb{R}$ :

$$f(\mathbf{x} + t\mathbf{z}) = f(\mathbf{x}) + \mathcal{A}(t\mathbf{z}) + \alpha(t\mathbf{z}) \|t\mathbf{z}\|, \quad t\mathbf{z} \rightarrow 0$$

Это эквивалентно

$$f(\mathbf{x} + t\mathbf{z}) = f(\mathbf{x}) + t\mathcal{A}\mathbf{z} + t\alpha(t), \quad t \rightarrow 0$$

Так как  $\|\mathbf{z}\|$  — константа. Тогда

$$\begin{aligned}\mathcal{A}\mathbf{z} &= \frac{f(\mathbf{x} + t\mathbf{z}) - f(\mathbf{x})}{t} - \alpha(t), \quad t \rightarrow 0 \iff \\ \mathcal{A}\mathbf{z} &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(\mathbf{x} + t\mathbf{z}) - f(\mathbf{x})}{t}\end{aligned}$$

■

**Утверждение 1.2.2.** (Производный оператор линейного отображения)

Пусть  $\mathcal{A} \in L(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ , тогда  $\mathcal{A}$  дифференцируемо в каждой точке и  $d_{\mathbf{x}}\mathcal{A} = \mathcal{A}$

*Доказательство.*

$$\mathcal{A}(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - \mathcal{A}(\mathbf{x}) = \mathcal{A}(\mathbf{x} + \mathbf{h} - \mathbf{x}) = \mathcal{A}(\mathbf{h})$$

■

**Утверждение 1.2.3.** (Линейность производного оператора)

Пусть  $f, g: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^m$ , дифференцируемы в  $\mathbf{x}$ . Тогда отображение  $\alpha f + \beta g$  дифференцируемо в точке  $\mathbf{x}$ , причем  $d_{\mathbf{x}}(\alpha f + \beta g) = \alpha d_{\mathbf{x}}f + \beta d_{\mathbf{x}}g$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}(\alpha f + \beta g)(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - (\alpha f + \beta g)(\mathbf{x}) &= [\alpha f](\mathbf{x} + \mathbf{h}) - [\alpha f](\mathbf{x}) + [\beta g](\mathbf{x} + \mathbf{h}) - [\beta g](\mathbf{x}) \\ &= [d_{\mathbf{x}}f + o] + [d_{\mathbf{x}}g + o] = d_{\mathbf{x}}f + d_{\mathbf{x}}g + o\end{aligned}$$

■

**Теорема 1.2.4.** (Дифференцируемость композиции)

Пусть  $f: \Omega \rightarrow \Omega_1$ ,  $g: \Omega_1 \rightarrow \mathbb{R}^k$ ,  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^m$ ,  $\Omega_1 \subseteq \mathbb{R}^n$  дифференцируемы в  $\mathbf{x}$ , тогда  $F = g \circ f$  дифференцируема в  $\mathbf{x}$ , причем  $d_{\mathbf{x}}F = d_{f(\mathbf{x})}g \cdot d_{\mathbf{x}}f$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}g(f(\mathbf{x} + \mathbf{h})) &= g(f(\mathbf{x}) + [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{h} + r(\mathbf{h})) \\ &= \{ \mathbf{v} = [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{h} + r(\mathbf{h}) \} \\ &= g(f(\mathbf{x}) + \mathbf{v}) = g(f(\mathbf{x})) + [d_{f(\mathbf{x})}g]\mathbf{v} + \tilde{r}(\mathbf{v}) \\ &= g(f(\mathbf{x})) + [d_{f(\mathbf{x})}g][d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{h} + [d_{f(\mathbf{x})}g]r(\mathbf{h}) + \tilde{r}(\mathbf{v})\end{aligned}$$

Осталось показать, что  $[d_{f(\mathbf{x})}g]r(\mathbf{h}) + \tilde{r}(\mathbf{v}) = o(\|\mathbf{h}\|)$ .

$$\|[d_{f(\mathbf{x})}g]r(\mathbf{h}) + \tilde{r}(\mathbf{v})\| \leq \left\| [d_{f(\mathbf{x})}g] \frac{r(\mathbf{h})}{\|r(\mathbf{h})\|} \|r(\mathbf{h})\| \right\| + \tilde{\alpha}(\|\mathbf{v}\|) \|\mathbf{v}\|$$

Обозначим  $\mathbf{w} = \frac{r(\mathbf{h})}{\|r(\mathbf{h})\|}$ , причем  $\|\mathbf{w}\| = 1$ . Из определения нормы оператора получаем

$$\|[d_{f(\mathbf{x})}g]\mathbf{w}\| \leq \|d_{f(\mathbf{x})}g\|$$

Кроме того,  $\|\mathbf{v}\| \leq \|d_{\mathbf{x}}f\| \|\mathbf{h}\| + \alpha(\|\mathbf{h}\|) \|\mathbf{h}\|$ . Окончательно получаем

$$\|[d_{f(\mathbf{x})}g]r(\mathbf{h}) + \tilde{r}(\mathbf{v})\| \leq \|d_{f(\mathbf{x})}g\| \|r(\mathbf{h})\| + \tilde{\alpha}(\|d_{\mathbf{x}}f\| \cdot \|\mathbf{h}\| + \alpha(\|\mathbf{h}\|) \cdot \|\mathbf{h}\|) \|\mathbf{v}\| \leq \beta(\|\mathbf{h}\|) \|\mathbf{h}\|$$

Для некоторой  $\beta(t) \xrightarrow[t \rightarrow 0]{} 0$ .

■



**Определение.** Пусть  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^m$ ,  $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n\}$  — стандартный базис  $\mathbb{R}^n$ , тогда отображения

$$f_i(\mathbf{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \langle f(\mathbf{x}), \mathbf{u}_i \rangle$$

где  $f_i: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ , называются *координатными функциями*.

**Теорема 1.2.5.** (Дифференцируемость координатных функций)

Пусть  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^m$ ,  $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$ , тогда

$$f \text{ дифференцируемо в } \mathbf{x} \iff \forall i \ f_i \text{ дифференцируемо в } \mathbf{x}$$

причем

$$d_{\mathbf{x}}f = \begin{pmatrix} d_{\mathbf{x}}f_1 \\ \vdots \\ d_{\mathbf{x}}f_n \end{pmatrix}$$

*Доказательство.*

$\Leftarrow$

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x})\mathbf{u}_i = \sum_{i=1}^n g_i(f_i(\mathbf{x}))$$

где  $g_i(t) = t\mathbf{u}_i$  — линейно, то есть дифференцируемо. Тогда  $f$  дифференцируемо как сумма композиций дифференцируемых функций.

$\Rightarrow$   $f_i$  дифференцируемы как композиции  $f$  и соответствующей проекции (проекция линейна, то есть дифференцируема).

■

**Определение.** Пусть  $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\Omega \in \mathbb{R}^m$  — область, тогда *производной по направлению*  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^n$  в точке  $\mathbf{x}$  называется

$$D_{\mathbf{u}}f(\mathbf{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ \mathbf{x} + t\mathbf{u} \in \Omega}} \frac{f(\mathbf{x} + t\mathbf{u}) - f(\mathbf{x})}{t}$$

если он существует.

**Определение.** Пусть  $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\Omega \in \mathbb{R}^m$ ,  $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n\}$  — стандартный базис  $\mathbb{R}^n$ , тогда *частной производной*  $f$  по  $k$ -й переменной называется

$$\frac{\partial f}{\partial x_k}(\mathbf{x}) \stackrel{\text{def}}{=} f'_k \stackrel{\text{def}}{=} D_k f(\mathbf{x}) \stackrel{\text{def}}{=} D_{\mathbf{u}_k} f(\mathbf{x})$$

**Утверждение 1.2.6.** Пусть  $f: \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$ ,  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ . Тогда

$$\exists D_{\mathbf{u}}f(\mathbf{x}) = [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{u}$$

*Доказательство.* Для любых  $t \in \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{x} + t\mathbf{u} \in \Omega$  имеем

$$\begin{aligned} \frac{f(\mathbf{x} + t\mathbf{u}) - f(\mathbf{x})}{t} &= \frac{[d_{\mathbf{x}}f](t\mathbf{u}) + r(t\mathbf{u})}{t} \\ &= [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{u} + \frac{r(t\mathbf{u})}{t} \leq [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{u} + \frac{\alpha(\mathbf{u})\|t\mathbf{u}\|}{t} = [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{u} + \alpha(\mathbf{u})\|\mathbf{u}\| \end{aligned}$$

■

**Теорема 1.2.7.** (Вид матрицы Якоби) Пусть  $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$ , тогда

$$d_{\mathbf{x}}f = \begin{pmatrix} D_1f_1(\mathbf{x}) & D_2f_1(\mathbf{x}) & \cdots & D_mf_1(\mathbf{x}) \\ D_1f_2(\mathbf{x}) & D_2f_2(\mathbf{x}) & \cdots & D_mf_2(\mathbf{x}) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ D_1f_n(\mathbf{x}) & D_2f_n(\mathbf{x}) & \cdots & D_mf_n(\mathbf{x}) \end{pmatrix}$$

*Доказательство.* Пусть  $(\mathbf{e}_i)$  — базис  $\mathbb{R}^m$ ,  $(\tilde{\mathbf{e}}_j)$  — базис  $\mathbb{R}^n$ , тогда

$$\begin{aligned} [d_{\mathbf{x}}f]_{i,j} &= \langle [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{e}_i, \tilde{\mathbf{e}}_j \rangle = \left\langle \frac{[d_{\mathbf{x}}f](t\mathbf{e}_i)}{t}, \tilde{\mathbf{e}}_j \right\rangle = \left\langle \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(\mathbf{x} + t\mathbf{e}_i) - f(\mathbf{x})}{t}, \tilde{\mathbf{e}}_j \right\rangle \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \left\langle \frac{f(\mathbf{x} + t\mathbf{e}_i) - f(\mathbf{x})}{t}, \tilde{\mathbf{e}}_j \right\rangle = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f_j(\mathbf{x} + t\mathbf{e}_i) - f_j(\mathbf{x})}{t} = D_{ij}f(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

■

**Утверждение 1.2.8.** Пусть  $f : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ . Тогда

$$D_{\mathbf{u}}f(\mathbf{x}) = \langle \text{grad } f(\mathbf{x}), \mathbf{u} \rangle$$

*Доказательство.*

$$D_{\mathbf{u}}f(\mathbf{x}) = [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{u} = [\text{grad } f(\mathbf{x})]\mathbf{u} = \langle \text{grad } f(\mathbf{x}), \mathbf{u} \rangle$$

■

**Утверждение 1.2.9.** (Необходимое условие дифференцируемости)

Если  $f$  дифференцируемо в  $\mathbf{x}$ , то существуют все частные производные в точке  $\mathbf{x}$ , причем матрица Якоби  $f$  в точке  $\mathbf{x}$  совпадает с матрицей, составленной из матриц Якоби  $f_i$  в точке  $\mathbf{x}$ :

$$d_{\mathbf{x}}f = \left( \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_1}(\mathbf{x}), \dots, \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_m}(\mathbf{x}) \right)$$

*Доказательство.* Подставим в определение дифференцируемости  $\mathbf{h} = t\mathbf{e}_k$ :

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x} + t\mathbf{e}_k) &= f(\mathbf{x}) + [d_{\mathbf{x}}f](t\mathbf{e}_k) + \alpha(\mathbf{h})\|\mathbf{h}\| \\ &= f(\mathbf{x}) + t[d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{e}_k + \alpha(\mathbf{h})\|\mathbf{h}\| \end{aligned}$$

Отсюда по определению частной производной получаем

$$\frac{\partial f}{\partial x_k}(\mathbf{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(\mathbf{x} + t\mathbf{e}_k) - f(\mathbf{x})}{t} = [d_{\mathbf{x}}f]\mathbf{e}_k$$

■

**Теорема 1.2.10.** (Достаточное условие дифференцируемости)

Пусть  $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{a} \in \Omega$ ,  $B(\mathbf{a}) \subseteq \Omega$ , в  $B(\mathbf{a})$  существуют все частные производные, причем они непрерывны в точке  $\mathbf{a}$ . Тогда  $f$  дифференцируемо в точке  $\mathbf{a}$ .

**Доказательство.** Докажем теорему для случая  $m = 2$ . Схема, примененная в доказательстве тривиально обобщается на произвольные  $m$ .

$$\begin{aligned}
f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) - f(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2) &= (f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) - f(\mathbf{a}_1, \mathbf{x}_2)) + (f(\mathbf{a}_1, \mathbf{x}_2) - f(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2)) \\
&\stackrel{\text{Лагранж}}{=} f'_{\mathbf{x}_1}(\tilde{\mathbf{x}}_1, \mathbf{x}_2)(\mathbf{x}_1 - \mathbf{a}_1) + f'_{\mathbf{x}_2}(\mathbf{x}_1, \tilde{\mathbf{x}}_2)(\mathbf{x}_2 - \mathbf{a}_2) \\
&= f'_{\mathbf{x}_1}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2)(\mathbf{x}_1 - \mathbf{a}_1) + f'_{\mathbf{x}_2}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2)(\mathbf{x}_2 - \mathbf{a}_2) \\
&\quad + \left[ \underbrace{(f'_{\mathbf{x}_1}(\tilde{\mathbf{x}}_1, \mathbf{x}_2) - f'_{\mathbf{x}_1}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2))}_{\rightarrow 0 \text{ по непрерывности}} \frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{a}_1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|} + \underbrace{(f'_{\mathbf{x}_2}(\mathbf{x}_1, \tilde{\mathbf{x}}_2) - f'_{\mathbf{x}_2}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2))}_{\rightarrow 0 \text{ по непрерывности}} \frac{\mathbf{x}_2 - \mathbf{a}_2}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|} \right] \|\mathbf{x} - \mathbf{a}\| \\
&= f'_{\mathbf{x}_1}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2)(\mathbf{x}_1 - \mathbf{a}_1) + f'_{\mathbf{x}_2}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2)(\mathbf{x}_2 - \mathbf{a}_2) + \alpha(\mathbf{x} - \mathbf{a}) \|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|
\end{aligned}$$

■

**Теорема 1.2.11.** Пусть  $f, g: \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\lambda: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{a} \in \Omega$ ,  $f, g, \lambda$  дифференцируемы в  $\mathbf{a}$ . Тогда  $\lambda f$ ,  $\langle f, g \rangle$  дифференцируемы в  $\mathbf{a}$ , причем

- $[d_{\mathbf{a}}(\lambda f)]\mathbf{h} = [d_{\mathbf{a}}\lambda]\mathbf{h} \cdot f(\mathbf{a}) + \lambda(\mathbf{a}) \cdot [d_{\mathbf{a}}f]\mathbf{h}$
- $[d_{\mathbf{a}}\langle f, g \rangle]\mathbf{h} = \langle [d_{\mathbf{a}}f]\mathbf{h}, g(\mathbf{a}) \rangle + \langle f(\mathbf{a}), [d_{\mathbf{a}}g]\mathbf{h} \rangle$

**Доказательство.**

- Докажем покомпонентно:

$$\begin{aligned}
&(\lambda f_i)(\mathbf{a} + \mathbf{h}) - (\lambda f_i)(\mathbf{a}) \\
&= \lambda(\mathbf{a} + \mathbf{h}) \cdot f_i(\mathbf{a} + \mathbf{h}) - (\lambda f_i)(\mathbf{a}) \\
&= (\lambda(\mathbf{a}) + d_{\mathbf{a}}\lambda\mathbf{h} + \alpha(\mathbf{h})\|\mathbf{h}\|) \cdot (f_i(\mathbf{a}) + d_{\mathbf{a}}f_i\mathbf{h} + \beta(\mathbf{h})\|\mathbf{h}\|) - (\lambda f_i)(\mathbf{a}) \\
&= [d_{\mathbf{a}}\lambda] \cdot f_i(\mathbf{a}) + \lambda(\mathbf{a}) \cdot [d_{\mathbf{a}}f_i]\mathbf{h} + o(\mathbf{h})
\end{aligned}$$

•

$$\begin{aligned}
[d_{\mathbf{a}}\langle f, g \rangle]\mathbf{h} &= d_{\mathbf{a}} \left[ \sum_{i=1}^n f_i \cdot g_i \right] \mathbf{h} = \sum_{i=1}^n d_{\mathbf{a}}[f_i \cdot g_i]\mathbf{h} = \sum_{i=1}^n ([d_{\mathbf{a}}f_i]\mathbf{h} \cdot g_i(\mathbf{a}) + f_i(\mathbf{a}) \cdot [d_{\mathbf{a}}g_i]\mathbf{h}) \\
&= \sum_{i=1}^n ([d_{\mathbf{a}}f_i]\mathbf{h} \cdot g_i(\mathbf{a})) + \sum_{i=1}^n (f_i(\mathbf{a}) \cdot [d_{\mathbf{a}}g_i]\mathbf{h}) = \langle [d_{\mathbf{a}}f]\mathbf{h}, g(\mathbf{a}) \rangle + \langle f(\mathbf{a}), [d_{\mathbf{a}}g]\mathbf{h} \rangle
\end{aligned}$$

■

**Определение.** Пусть  $f: \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$ . Тогда *градиентом*  $\varphi$  в точке  $\mathbf{x}$  называется вектор

$$\text{grad } f(\mathbf{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1}(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_m}(\mathbf{x}) \end{pmatrix}$$

**Теорема 1.2.12.** (Экстремальное свойство градиента)

Пусть  $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$ ,  $f$  дифференцируемо в  $\mathbf{x}$ ,  $\text{grad } f(\mathbf{x}) \neq 0$  Тогда

$$\mathbf{l} = \frac{\text{grad } f(\mathbf{x})}{\|\text{grad } f(\mathbf{x})\|}$$

— направление наибольшего возрастания  $f$ , то есть

$$\forall \mathbf{h} \in \mathbb{R}^m, \|\mathbf{h}\| = 1 \implies D_{\mathbf{h}}f(\mathbf{x}) \leq D_{\mathbf{l}}f(\mathbf{x})$$

*Доказательство.*

$$D_{\mathbf{h}}f(\mathbf{x}) = [\mathbf{d}_{\mathbf{x}}f] \mathbf{h} = [\text{grad } f(\mathbf{x})] \mathbf{h} = \langle \text{grad } f(\mathbf{x}), \mathbf{h} \rangle \leq \|\text{grad } f(\mathbf{x})\| \|\mathbf{h}\| = \|\text{grad } f(\mathbf{x})\|$$

■

## 1.3 Теоремы Лагранжа для отображений

**Теорема 1.3.1.** (Лагранжа для векторнозначных функций)

Пусть  $f \in C([a, b], \mathbb{R}^n)$ , дифференцируемо на  $(a, b)$ . Тогда

$$\exists c \in (a, b): \|f(b) - f(a)\| \leq \|f'(c)\| |b - a|$$

*Доказательство.* При  $f(a) = f(b)$  утверждение тривиально. Положим  $\varphi(x) = \langle f(b) - f(a), f(x) - f(a) \rangle$ . Тогда

$$\varphi(a) = 0, \varphi(b) = \langle f(b) - f(a), f(b) - f(a) \rangle = \|f(b) - f(a)\|^2$$

Применим теорему Лагранжа для  $\varphi$ :

$$\begin{aligned} \exists c \in (a, b): \|f(b) - f(a)\|^2 = \varphi(b) - \varphi(a) &\stackrel{\text{Лагранж}}{=} \varphi'(c) |b - a| = \langle f(b) - f(a), f'(c) \rangle \cdot |b - a| \\ &\stackrel{\text{КБШ}}{\leq} \|f(b) - f(a)\| \cdot \|f'(c)\| |b - a| \implies \|f(b) - f(a)\| \leq \|f'(c)\| |b - a| \end{aligned}$$

■

**Теорема 1.3.2.** (Лагранжа для отображений)

Пусть  $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ , дифференцируемо на  $\Omega$ ,  $[\mathbf{a}, \mathbf{b}] \subseteq \Omega$ , тогда

$$\|f(\mathbf{b}) - f(\mathbf{a})\| \leq \sup_{\mathbf{x} \in [\mathbf{a}, \mathbf{b}]} \|d_{\mathbf{x}} f\| \cdot \|\mathbf{b} - \mathbf{a}\|$$

*Доказательство.*  $g = f(\mathbf{a} + t(\mathbf{b} - \mathbf{a}))$  для  $t \in [0, 1]$  — дифференцируемо как композиция дифференцируемых функций. По предыдущей теореме

$$\begin{aligned} \exists t_0 \in (0, 1): \|g(1) - g(0)\| &\leq \|g'(t_0)\| = \|f'(\mathbf{a} + t_0(\mathbf{b} - \mathbf{a})) \cdot (\mathbf{b} - \mathbf{a})\| \\ &\leq \|f'(\mathbf{a} + t_0(\mathbf{b} - \mathbf{a}))\| \|\mathbf{b} - \mathbf{a}\| \leq \sup_{\mathbf{x} \in [\mathbf{a}, \mathbf{b}]} \|d_{\mathbf{x}} f\| \cdot \|\mathbf{b} - \mathbf{a}\| \end{aligned}$$

■

## 1.4 Формула Тейлора

**Определение.** Пусть  $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\Omega$  — область,  $i_1, \dots, i_k \in \{1, 2, \dots, m\}$ . Определим частные производные высшего порядка по индукции:

$$D_{i_1, \dots, i_k} f \stackrel{\text{def}}{=} D_{i_k} (D_{i_1, \dots, i_{k-1}} f)$$

**Теорема 1.4.1.** (О независимости ч.п. от порядка дифференцирования)

Пусть  $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\Omega$  — область,  $(x_0, y_0) \in \Omega$ ,  $\exists B((x_0, y_0), r) \subseteq \Omega$ , причем в  $B((x_0, y_0), r)$  существуют  $D_{12}f$  и  $D_{21}f$ , непрерывные в точке  $(x_0, y_0)$ . Тогда  $D_{12}f(x_0, y_0) = D_{21}f(x_0, y_0)$

*Доказательство.*

$$\alpha(h) = f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0 + k) + f(x_0, y_0)$$

Тогда  $\alpha(0) = 0$ :

$$\begin{aligned} \alpha(h) = \alpha(h) - \alpha(0) &\stackrel{\text{Лагранж}}{=} \alpha'(\tilde{h})h = [f'_x(x_0 + \tilde{h}, y_0 + k) - f'_x(x_0 + \tilde{h}, y_0)]h \\ &\stackrel{\text{Лагранж}}{=} f''_{xy}(x_0 + \tilde{h}, y_0 + \tilde{k})hk \end{aligned}$$

Аналогично введем  $\beta(k)$ :

$$\beta(k) = f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0 + k) + f(x_0, y_0)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \beta(k) = \beta(k) - \beta(0) &\stackrel{\text{Лагранж}}{=} \beta'(\bar{k})k = [f'_y(x_0 + h, y_0 + \bar{k}) - f'_y(x_0, y_0 + \bar{k})]k \\ &\stackrel{\text{Лагранж}}{=} f''_{yx}(x_0 + \bar{h}, y_0 + \bar{k})hk \end{aligned}$$

Заметим, что  $\alpha(h) = \beta(k)$ . Осталось перейти к пределу при  $(h, k) \rightarrow (0, 0)$  и воспользоваться непрерывностью частных производных в точке  $(x_0, y_0)$ . ■

**Следствие 1.4.2.** Пусть  $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $i_1, \dots, i_k \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $x \in \Omega$ ,  $\exists B(x, r) \subseteq \Omega$ , причем в  $B(x, r)$  для любой перестановки индексов  $\pi \in S_k$  существуют и непрерывны в  $x$  частные производные  $D_{i_{\pi_1}, \dots, i_{\pi_k}} f$ . Тогда все они совпадают в точке  $x$ .

*Доказательство.* Доказательство сводится к координатным функциям, поэтому считаем, что  $n = 1$ . Предыдущая теорема дает возможность менять местами пары индексов. Осталось заметить, что группа перестановок порождается транспозициями. ■

**Определение.** Множество функций  $f : \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ , у которых все частные производные порядка не более  $r$  существуют и непрерывны на  $\Omega$ , будем обозначать  $C^r(\Omega)$

**Определение.** Пусть  $k_1, k_2, \dots, k_m \in \mathbb{N}_0$ , тогда набор  $k = (k_1, k_2, \dots, k_m)$  будем называть *мультииндексом*. Используются обозначения  $|k| = k_1 + \dots + k_m$ ,

$$\frac{\partial^k}{\partial x^k} f \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial^{|k|}}{\partial x_1^{k_1} \dots \partial x_m^{k_m}} f$$

**Лемма 1.4.3.** (Полиномиальная формула)

$$(a_1 + \dots + a_m)^r = \sum_{n_1=1}^m \sum_{n_2=1}^m \dots \sum_{n_r=1}^m a_{n_1} a_{n_2} \dots a_{n_r} = \sum_{|k|=r} \frac{r!}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m}$$

*Доказательство.* Первое равенство очевидно по правилам раскрытия скобок. Докажем второе равенство индукцией по  $r$ .

- Для  $r = 1$  утверждение очевидно.
- Переход:

$$\begin{aligned} (a_1 + \dots + a_m)^{r+1} &= (a_1 + \dots + a_m) \cdot (a_1 + \dots + a_m)^r \\ &= (a_1 + \dots + a_m) \cdot \sum_{|k|=r} \frac{r!}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m} \\ &= \sum_{|k|=r} \frac{r!}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1+1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m} + \dots + \sum_{|k|=r} \frac{r!}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m+1} \\ &= [\text{переобозначим } k_i = k_i + 1 \text{ в } i\text{-й сумме}] \\ &= \sum_{\substack{|k|=r+1 \\ k_1 \geq 1}} \frac{r! \cdot k_1}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m} + \dots + \sum_{\substack{|k|=r+1 \\ k_m \geq 1}} \frac{r! \cdot k_m}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m} \\ &= [\text{добавим все пропущенные слагаемые с } k_i = 0] \\ &= \sum_{|k|=r+1} \frac{r! \cdot k_1}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m} + \dots + \sum_{|k|=r+1} \frac{r! \cdot k_m}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m} \\ &= \sum_{|k|=r+1} \frac{r! \cdot (k_1 + k_2 + \dots + k_m)}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m} \\ &= \sum_{|k|=r+1} \frac{(r+1)!}{k_1! \dots k_m!} a_1^{k_1} a_2^{k_2} \dots a_m^{k_m} \end{aligned}$$

■

**Лемма 1.4.4.** (О дифференцировании сдвига)

$f: \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\Omega$  — область,  $f \in C^r(\Omega)$ ,  $\mathbf{a} \in \Omega$ ,  $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^m$ ,  $\forall t \in [-1, 1]$   $\mathbf{a} + t\mathbf{h} \in \Omega$ , тогда для отображения  $\varphi(t) = f(\mathbf{a} + t\mathbf{h})$  и для  $k \leq r$  выполнено

$$\varphi^{(k)}(0) = \sum_{|j|=k} \frac{k!}{j!} \mathbf{h}^j \frac{\partial^j f}{\partial x^j}(\mathbf{a})$$

*Доказательство.* Для доказательства этого факта достаточно показать, что

$$\varphi^{(k)}(t) = \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \mathbf{h}_1 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_m} \mathbf{h}_m \right)^k \cdot f(\mathbf{a} + t\mathbf{h})$$

Докажем по индукции:

- Для  $k = 0$  утверждение очевидно.
- Переход:

$$\begin{aligned} \varphi^{(k)}(t) &= (\varphi^{(k-1)}(t))' = \left( \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \mathbf{h}_1 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_m} \mathbf{h}_m \right)^{k-1} f(\mathbf{a} + t\mathbf{h}) \right)' \\ &= \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \mathbf{h}_1 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_m} \mathbf{h}_m \right) \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \mathbf{h}_1 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_m} \mathbf{h}_m \right)^{k-1} f(\mathbf{a} + t\mathbf{h}) \\ &= \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \mathbf{h}_1 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_m} \mathbf{h}_m \right)^k f(\mathbf{a} + t\mathbf{h}) \end{aligned}$$

■

**Теорема 1.4.5.** (Формула Тейлора в форме Лагранжа)

$f: \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f \in C^{r+1}(\Omega)$ ,  $\Omega$  — область,  $\mathbf{a} \in \Omega$ ,  $\mathbf{x} \in B(\mathbf{x}, r) \subseteq \Omega$ , тогда

$$\exists \theta \in (0, 1): f(\mathbf{x}) = \sum_{|k| \leq r} \frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a})(\mathbf{x} - \mathbf{a})^k + \sum_{|k|=r+1} \frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a} + \theta(\mathbf{x} - \mathbf{a}))(\mathbf{x} - \mathbf{a})^k$$

*Доказательство.* Пусть  $\varphi(t) = f(\mathbf{a} + t\mathbf{h})$  для  $\mathbf{x} = \mathbf{a} + \mathbf{h}$ ,  $\mathbf{h} = \mathbf{x} - \mathbf{a}$ . Выпишем формулу Тейлора в форме Лагранжа для  $\varphi$ :

$$\varphi(1) = \sum_{k=0}^r \frac{\varphi^{(k)}(0)}{k!} + \frac{\varphi^{(r+1)}(\theta)}{(r+1)!}$$

Пользуясь леммой о дифференцировании сдвига, получаем искомое равенство. ■

**Теорема 1.4.6.** (Формула Тейлора в форме Пеано)

$f: \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f \in C^{r+1}(\Omega)$ ,  $\Omega$  — область,  $\mathbf{a} \in \Omega$ ,  $\mathbf{x} \in B(\mathbf{x}, r) \subseteq \Omega$ , тогда

$$\exists \theta \in (0, 1): f(\mathbf{x}) = \sum_{|k| \leq r} \frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a})(\mathbf{x} - \mathbf{a})^k + o(\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^r)$$

*Доказательство.* Достаточно показать, что

$$\sum_{|k|=r+1} \frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a} + \theta(\mathbf{x} - \mathbf{a}))(\mathbf{x} - \mathbf{a})^k = o(\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^r)$$

Проверим это:

$$\sum_{|k|=r+1} \frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a} + \theta(\mathbf{x} - \mathbf{a})) \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{a})^k}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^r} = \sum_{|k|=r+1} \frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a} + \theta(\mathbf{x} - \mathbf{a})) \frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{a}_1)^{k_1} \dots (\mathbf{x}_m - \mathbf{a}_m)^{k_m}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^r}$$



$$= \sum_{|k|=r+1} \frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a} + \theta(\mathbf{x} - \mathbf{a})) \frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{a}_1)^{k_1}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^{k_1}} \cdots \frac{(\mathbf{x}_m - \mathbf{a}_m)^{k_m}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^{k_m}} \|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|$$

Все дроби вида

$$\frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{a}_i)^{k_i}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^{k_i}}$$

меньше единицы, выражения вида

$$\frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a} + \theta(\mathbf{x} - \mathbf{a}))$$

постоянны. Поэтому

$$\sum_{|k|=r+1} \frac{1}{k!} \frac{\partial^k f}{\partial x^k}(\mathbf{a} + \theta(\mathbf{x} - \mathbf{a})) \frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{a}_1)^{k_1}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^{k_1}} \cdots \frac{(\mathbf{x}_m - \mathbf{a}_m)^{k_m}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\|^{k_m}} \|\mathbf{x} - \mathbf{a}\| \rightarrow 0$$

При  $\|\mathbf{x} - \mathbf{a}\| \rightarrow 0$ . ■

## 1.5 Диффеоморфизмы

**Определение.** Областью называют открытое связное множество.

**Определение.** Топологические пространства  $X, Y$  гомеоморфны, если существует обратимое и в обе стороны непрерывное  $f: X \rightarrow Y$ .  $f$  называют гомеоморфизмом.

**Определение.** Диффеоморфизмом гладких многообразий  $M, N$  называется обратимое и в обе стороны гладкое отображение  $f: M \rightarrow N$ .

**Определение.** Пусть  $\mathcal{O}$  — область в  $\mathbb{R}^m$ . Тогда отображение  $f: \mathcal{O} \rightarrow \mathbb{R}^m$  называется диффеоморфизмом, если оно обратимо и в обе стороны дифференцируемо.

**Лемма 1.5.1.** (О почти локальной инъективности)

Пусть  $f: \mathcal{O} \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{O}$ ,  $f$  дифференцируемо в  $\mathbf{x}_0$ ,  $\det f'(\mathbf{x}_0) \neq 0$ , тогда  $\exists c, \delta > 0$  такие, что  $\forall \mathbf{h}: \|\mathbf{h}\| < \delta \implies \|f(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - f(\mathbf{x})\| \geq c \|\mathbf{h}\|$

Доказательство. TBD ■

**Теорема 1.5.2.** (О сохранении области)

Пусть  $f: \mathcal{O} \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $\forall \mathbf{x} \in \mathcal{O} \det f'(\mathbf{x}) \neq 0$ , тогда  $f$  открыто.

Доказательство. TBD ■

**Следствие 1.5.3.** Пусть  $f: \mathcal{O} \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{l \leq m}$ ,  $\forall \mathbf{x} \in \mathcal{O} \operatorname{rank} f'(\mathbf{x}) = l$ , тогда  $f$  открыто.

Доказательство. TBD ■

**Теорема 1.5.4.** (О гладкости обратного отображения)

Пусть  $\mathcal{O} \subseteq \mathbb{R}^m$  — область,  $f \in C^r(\mathcal{O}, \mathbb{R}^m)$ ,  $r \in \mathbb{N} \cup \{+\infty\}$ ,  $\forall \mathbf{x} \in \mathcal{O} \det f'(\mathbf{x}) \neq 0$ ,  $f$  обратимо, тогда  $f^{-1} \in C^r$  и  $(f^{-1})'(\mathbf{y}_0) = (f'(\mathbf{x}_0))^{-1}$ , при  $\mathbf{y}_0 = f(\mathbf{x}_0)$ .

Доказательство. TBD ■

**Лемма 1.5.5.** (О приближении отображения его линеаризацией)

Пусть  $f \in C^1(\mathcal{O}, \mathbb{R}^m)$ ,  $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{O}$ , тогда  $\forall \mathbf{h}$

$$\|f(\mathbf{x}_0 + \mathbf{h}) - f(\mathbf{x}_0) - f'(\mathbf{x}_0)\mathbf{h}\| \leq M \|\mathbf{h}\|$$

где

$$M = \sup_{\mathbf{z} \in [\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_0 + \mathbf{h}]} \|f'(\mathbf{z}) - f'(\mathbf{x}_0)\|$$

Доказательство. TBD ■

**Теорема 1.5.6.** (О локальной обратимости)

Пусть  $f \in C^1(\mathcal{O}, \mathbb{R}^m)$ ,  $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{O}$ ,  $\det f'(\mathbf{x}_0) \neq 0$ , тогда  $\exists U(\mathbf{x}_0)$  такая, что  $f|_U$  — диффеоморфизм.

Доказательство. TBD ■

**Теорема 1.5.7.** (О неявном отображении)

Пусть  $\mathcal{O}$  открыто,  $f: \mathcal{O} \subseteq \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $(\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n) \mapsto f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ,  $f \in C^r$ ,

$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \in \mathcal{O}: f(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 0, \det f'_y(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \neq 0$ , тогда

- $\exists U(\mathbf{a}), \exists U(\mathbf{b}), \exists! \varphi: U(\mathbf{a}) \rightarrow U(\mathbf{b}) \in C^r$  такое, что  $\forall \mathbf{x} \in U(\mathbf{a}) f(\mathbf{x}, \varphi(\mathbf{x})) = 0$
- $\varphi'(\mathbf{x}) = -(f'_y(\mathbf{x}, \varphi(\mathbf{x})))^{-1} \cdot f'_x(\mathbf{x}, \varphi(\mathbf{x}))$

Доказательство. TBD ■

**Определение.**  $M \subseteq \mathbb{R}^m$  называют  $k$ -мерным многообразием в  $\mathbb{R}^m$ , если оно локально гомеоморфно  $\mathbb{R}^k$ . Иными словами,  $\forall \mathbf{x} \in M \exists U(\mathbf{x}) \exists \varphi$  — гомеоморфизм:  $U(\mathbf{x}) \underset{\varphi}{\simeq} \mathbb{R}^k$ .

**Определение.**  $k$ -мерное многообразие  $M \subseteq \mathbb{R}^m$  называют *простым*, если оно гомеоморфно  $\mathbb{R}^k$ . Иными словами, в предыдущем определении можно выбрать  $U(\mathbf{x}) = M$ .

**Определение.** Пара  $\langle U(\mathbf{x}), \varphi \rangle$  из определения называется *картой*, или *параметризацией* многообразия в точке  $\mathbf{x}$ . Набор карт, который покрывает все  $M$ , называется *атласом*.

**Определение.** Простое  $k$ -мерное многообразие  $M$  называют  $C^r$ -гладким, если  $\varphi \in C^r$  — параметризация  $M$  и  $\forall \mathbf{x} \in \mathcal{O} \text{ rank } f'(\mathbf{x}) \neq 0$ .

**Теорема 1.5.8.** (О задании гладкого многообразия системой уравнений)  
Пусть  $M \subseteq \mathbb{R}^m, 1 \leq k < m, r \in \mathbb{N} \cup \{+\infty\}$ , тогда  $\forall \mathbf{p} \in M$  эквивалентны утверждения:

- $\exists U(\mathbf{p}) \subseteq \mathbb{R}^m$  — открытое такое, что  $M \cap U$  — простое  $k$ -мерное  $C^r$ -гладкое многообразие.
- $\exists \tilde{U}(\mathbf{p}) \subseteq \mathbb{R}^m$  — открытое такое, что  $M \cap \tilde{U}$  можно задать системой  $C^r$ -гладких уравнений, иначе говоря:  $\exists f_1, \dots, f_{m-k}: \tilde{U} \rightarrow \mathbb{R} \in C^r$  такие, что  $\mathbf{x} \in M \cap \tilde{U} \iff \forall i f_i(\mathbf{x}) = 0$ , причем  $\{\text{grad } f_i(\mathbf{p})\}$  линейно независимы.

Доказательство. TBD ■

**Следствие 1.5.9.** (О двух параметризациях)

Пусть  $M$  —  $k$ -мерное простое  $C^r$ -гладкое многообразие,  $\mathbf{p} \in M$ , причем  $C^r \ni \varphi_1: \mathcal{O}_1 \subseteq \mathbb{R}^k \rightarrow U \cap M, C^r \ni \varphi_2: \mathcal{O}_2 \subseteq \mathbb{R}^k \rightarrow U \cap M$  — параметризации  $U(\mathbf{p}) \cap M$ . Тогда  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  отличаются на диффеоморфизм, а именно,  $\exists \psi: \mathcal{O}_1 \rightarrow \mathcal{O}_2$  — диффеоморфизм, причем  $\varphi_1 = \varphi_2 \circ \psi$ .

Доказательство. TBD ■

**Определение.** Пусть  $M$  —  $C^r$ -гладкое  $k$ -мерное многообразие в  $\mathbb{R}^m, \mathbf{p} \in M$ ,  $\varphi: \mathcal{O} \subseteq \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^m$  — параметризация окрестности  $U(\mathbf{p})$ , причем  $\varphi(\mathbf{a}) = \mathbf{p}$ . Тогда касательным пространством к  $M$  в точке  $\mathbf{p}$  называется  $T_p(M) = \text{Im } \varphi'(\mathbf{a})$ .

**Теорема 1.5.10.** (О корректности определения касательного пространства)  
Касательное пространство не зависит от выбора параметризации.

Доказательство. TBD ■

**Теорема 1.5.11.** (О касательном пространстве к гладкому пути)

Пусть  $M$  — гладкое многообразие. Тогда  $\mathbf{v} \in T_p(M) \iff \exists$  гладкий путь  $\gamma: [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}^m: \gamma([-1, 1]) \subseteq M$ .

Доказательство. TBD

■

**Теорема 1.5.12.** (О касательном пространстве к графику функции)

Касательное пространство к графику  $C^r \ni f: \mathcal{O} \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$  в точке  $\mathbf{p} = (\mathbf{x}_0, f(\mathbf{x}_0))$  задается уравнением

$$y - f(\mathbf{x}_0) = f'_1(\mathbf{x}_1)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) + \dots + f'_m(\mathbf{x}_m)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_m)$$

Доказательство. TBD

■

**Теорема 1.5.13.** (О касательном пространстве к поверхности уровня)

Касательное пространство к поверхности уровня функции  $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  задается уравнением

$$f'_x(x_0)(x - x_0) + f'_y(y_0)(y - y_0) + f'_z(z_0)(z - z_0) = 0$$

Доказательство. TBD

■

## 1.6 Относительный экстремум

**Определение.** Пусть  $f: E \subseteq \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\phi: E \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $M_\phi = \{x \in E \mid \phi(x) = 0\}$ ,  $x_0 \in E$ ,  $\phi(x_0) = 0$  называется точкой локального *относительного* экстремума, если  $x_0$  — точка локального экстремума  $f|_{M_\phi}$ .

**Теорема 1.6.1.** (Необходимое условие относительного экстремума)

Пусть  $C^1 \ni f: E \subseteq \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $C^1 \ni \phi: E \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $x_0 \in E$ ,  $\phi(x_0) = 0$ ,  $\text{rank } \phi'(x_0) = n$ ,  $x_0$  — точка локального экстремума, тогда  $\exists \lambda \in \mathbb{R}^n$ :

$$\begin{cases} f'(x_0) - \lambda \cdot \phi'(x_0) = 0 \\ \phi(x_0) = 0 \end{cases}$$

Доказательство. TBD ■

**Теорема 1.6.2.** (Достаточное условие относительного экстремума)

Пусть  $C^1 \ni f: E \subseteq \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $C^1 \ni \phi: E \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $x_0 \in E$ ,  $\phi(x_0) = 0$ ,  $\text{rank } \phi'(x_0) = n$ , выполнено необходимое условие относительного экстремума, то есть  $\exists \lambda \in \mathbb{R}^n$ :

$$\begin{cases} f'(x_0) - \lambda \cdot \phi'(x_0) = 0 \\ \phi(x_0) = 0 \end{cases}$$

кроме того, пусть  $h = (h_x \in \mathbb{R}^m, h_y \in \mathbb{R}^n)$ . Тогда, так как  $\text{rank } \phi'(x_0)$ , по  $h_x$  можно однозначно восстановить  $h_y$  такой, что  $\phi'(x_0)h = 0$ . Тогда рассмотрим квадратичную форму

$$Q(h_x) = d_{x_0}^2 G(h_x, h_y)$$

Где  $G = f - \lambda \cdot \phi$  — функция Лагранжа. В зависимости от определенности  $Q$  можно сделать вывод о наличии экстремума в точке  $x_0$ :

- $Q$  положительно определена  $\implies x_0$  — точка относительного локального минимума.
- $Q$  отрицательно определена  $\implies x_0$  — точка относительного локального максимума.
- $Q$  неопределена  $\implies x_0$  — не точка экстремума.
- В остальных случаях требуется более детальное исследование.

Доказательство. TBD ■

**Теорема 1.6.3.** (Вычисление нормы линейного оператора)

Пусть  $A \in \text{Lin}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^n)$ ,  $S$  — множество собственных чисел  $A^T A$ . Тогда

$$\|A\| = \max_{\lambda \in S} \sqrt{\lambda}$$

## Глава 2

# Функциональные последовательности и ряды

### 2.1 Поточечная и равномерная сходимости последовательностей функций

**Замечание.** Здесь и далее запись вида  $f \rightarrow \perp$  будет означать, что  $f$  сходится. Знак  $\perp$  используется, если не важно (или не известно), к чему сходится  $f$ .

**Определение.**  $f_n: E \rightarrow \mathbb{R}$  сходится поточечно к  $f: E \rightarrow \mathbb{R}$  на  $E$ , если

$$\forall x_0 \in E \quad f_n(x_0) \rightarrow f(x_0)$$

иными словами, раскрывая определение сходимости последовательности:

$$\forall x_0 \in E \quad [\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \quad |f_n(x_0) - f(x_0)| < \varepsilon]$$

Обозначение:  $f_n \rightarrow f$ .

**Примеры.** TBD

**Определение.**  $f_n: E \rightarrow \mathbb{R}$  сходится равномерно к  $f: E \rightarrow \mathbb{R}$  на  $E$ , если

$$\sup_{x \in E} |f_n(x) - f(x)| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

или, раскрывая описание супремума

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \quad [\forall x \in E \quad |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon]$$

Обозначение:  $f_n \rightrightarrows f$ .

**Замечание.** Из равномерной сходимости очевидным образом следует поточечная:

$$f_n \rightrightarrows f \implies f_n \rightarrow f$$

Про сходимость мы значем очень многое для случая метрических пространств. А нельзя ли переформулировать новые определения так, чтобы они оказались обычной сходимостью, просто в хитром метрическом пространстве?

**Предложение.** (Метрическое пространство ограниченных функций)

Положим

$$\mathcal{F} \stackrel{\text{def}}{=} \{X \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ ограничено} \}$$

На этом множестве тривиально задается структура линейного пространства:

$$\begin{aligned}(f + g)(x) &= f(x) + g(x) \\ (\lambda f)(x) &= \lambda f(x)\end{aligned}$$

Оказывается, можно ввести **метрику** на  $\mathcal{F}$ , сходимость по которой есть равномерная сходимость. Для  $f, g \in \mathcal{F}$  положим

$$\rho(f, g) \stackrel{\text{def}}{=} \sup_{x \in X} |f(x) - g(x)|$$

Проверим, что это — метрика на  $\mathcal{F}$

- i) Неотрицательность очевидна. Равенство нулю может выполняться только для равных функций.
- ii) Симметричность очевидна.
- iii) Проверим неравенство треугольника. Применим техническое описание супремума для  $\rho(f_1, f_2)$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists x: \sup_{y \in X} |f_1(y) - f_2(y)| - \varepsilon \leq |f_1(x) - f_2(x)|$$

Далее

$$\begin{aligned}\forall \varepsilon > 0 \exists x: \sup_{y \in X} |f_1(y) - f_2(y)| - \varepsilon &\leq |f_1(x) - f_2(x)| \leq |f_1(x) - f_3(x)| + |f_3(x) - f_2(x)| \\ &\leq \sup_{y \in X} |f_1(y) - f_3(y)| + \sup_{y \in X} |f_2(y) - f_3(y)| \\ &= \rho(f_1, f_3) + \rho(f_2, f_3)\end{aligned}$$

Получаем

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \rho(f_1, f_2) - \varepsilon \leq \rho(f_1, f_3) + \rho(f_2, f_3)$$

Откуда непосредственно следует

$$\rho(f_1, f_2) \leq \rho(f_1, f_3) + \rho(f_2, f_3)$$

Осталось только понять, что теперь означает сходимость по этой метрике. Пусть  $(f_n)$  — последовательность в  $\mathcal{F}$ , сходящаяся к  $f$  по метрике  $\rho$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \quad \rho(f_n, f) < \varepsilon$$

Раскроем значение  $\rho$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \quad [\forall x \in X \quad |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon]$$

А это — обычное определение равномерной сходимости!

Подобную конструкцию, по всей видимости, не получится ввести для поточечной сходимости. Зато, можно построить хаусдорфово топологическое пространство, в котором сходимость будет означать поточечную сходимость.

**Предложение.** (Топологическое пространство ограниченных функций)

Введем на  $\mathcal{F}$  топологию, порожденную следующими множествами:

$$U_\varepsilon(f)_{x_1, \dots, x_n} \stackrel{\text{def}}{=} \{g: X \rightarrow \mathbb{R} \mid \forall i \ |g(x_i) - f(x_i)| < \varepsilon\}$$

Поймем теперь, что означает сходимость в этом топологическом пространстве:

$$f_n \rightarrow f \iff \forall U_\varepsilon(f)_{x_1, \dots, x_n} \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \ f_n \in U_\varepsilon(f)_{x_1, \dots, x_n}$$

Что означает

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \ \forall i \ |f_n(x_i) - f(x_i)| < \varepsilon$$

Что как раз и есть поточечная сходимость! Просто запись вида

$$[\forall x_0 \in X \ \forall \varepsilon > 0] \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \ |f_n(x_0) - f(x_0)| < \varepsilon$$

В этом пространстве обретает вид

$$[\forall U_\varepsilon(f)_{x_0}] \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \ |f_n(x_0) - f(x_0)| < \varepsilon$$

**Теорема 2.1.1.** (Критерий Больцано-Коши равномерной сходимости)

$$f_n \rightrightarrows f \iff \forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \forall n, m > N \ [\forall x \ |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon]$$

*Доказательство.*

$\implies$  Обычное свойство всех последовательностей, сходящихся по метрике (если все  $f_n$  и  $f$  лежат в  $\mathcal{F}$ ). Общее доказательство такое:

$$|f_n(x) - f_m(x)| \leq |f_n(x) - f(x)| + |f(x) - f_m(x)| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$$

$\Leftarrow$  Зафиксируем  $x$ . Тогда  $f_n(x)$  — обычная фундаментальная вещественная последовательность. Тогда, так как  $\mathbb{R}$  — полное, получаем

$$\forall x \ \exists \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) =: f(x)$$

Покажем, что  $f_n \rightrightarrows f$ . Посмотрим на фундаментальность  $f_n$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \forall n, m > N \ [\forall x \ |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon]$$

и перейдем к пределу  $m \rightarrow +\infty$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \forall n > N \ [\forall x \ |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon]$$

Что и есть определение равномерной сходимости. ■

**Примеры.** TBD



## 2.2 Теоремы о равномерно сходящихся функциональных последовательностях

### Теорема 2.2.1. (Стокс-Зейдель)

Пусть  $f_n, f: X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $X$  — топологическое пространство,  $f_n$  непрерывны в  $c \in E$ , и  $f_n \rightrightarrows f$  на  $X$ . Тогда  $f$  непрерывна в  $c$ .

*Доказательство.* Для любых  $n$  выполнено

$$|f(x) - f(y)| \leq |f(x) - f_n(x)| + |f_n(x) - f_n(y)| + |f_n(y) - f(y)|$$

Воспользуемся равномерной сходимостью: выберем  $n$  таким, чтобы

$$|f(x) - f_n(x)| < \varepsilon$$

$$|f_n(y) - f(y)| < \varepsilon$$

Теперь воспользуемся непрерывностью  $f_n$ : выберем такую окрестность  $U(c)$ , чтобы  $\forall x, y \in U(c)$

$$|f_n(x) - f_n(y)| < \varepsilon$$

Тогда

$$|f(x) - f(y)| < 3\varepsilon$$

что и означает непрерывность  $f$  в точке  $c$ . ■

**Определение.** Будем говорить, что  $f_n$  сходится локально равномерно к  $f$  на  $X$ , если

$$\forall x \in X \exists U(x): f_n \rightrightarrows f \text{ на } U(x)$$

**Замечание.** Для выполнения условия теоремы Стокса-Зейделя достаточно равномерной сходимости на некоторой окрестности  $c$ .

**Замечание.** Для того, чтобы  $f$  было непрерывным на  $X$ , достаточно, чтобы  $f_n$  локально равномерно на  $X$  сходились к  $f$ .

### Теорема 2.2.2. (О предельном переходе под знаком интеграла)

Пусть  $f_n \in C([a, b])$ ,  $f_n \rightrightarrows f$  на  $[a, b]$ . Тогда

$$\int_a^b f_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_a^b f$$

иначе говоря, коммутативна следующая схема:

$$\begin{array}{ccc} f_n & \xrightarrow{\quad} & f \\ \downarrow \int & & \downarrow \int \\ \int_a^b f_n & \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} & \int_a^b f \end{array}$$

*Доказательство.*  $f$  непрерывна на  $[a, b]$  по теореме Стокса-Зейделя, поэтому интеграл имеет смысл. Тогда

$$\left| \int_a^b f_n - \int_a^b f \right| \leq \int_a^b |f_n - f| \leq \max_{x \in [a, b]} |f_n(x) - f(x)| \cdot |b - a|$$

Из равномерной сходимости имеем:

$$\max_{x \in [a, b]} |f_n(x) - f(x)| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

тогда

$$\left| \int_a^b f_n - \int_a^b f \right| \leq \max_{x \in [a, b]} |f_n(x) - f(x)| \cdot |b - a| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

■

**Теорема 2.2.3.** (Правило Лейбница)

$f : [x_1, x_2] \times [y_1, y_2] \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\exists f'_y, f'_y, f$  непрерывны. Пусть

$$\phi(y) = \int_{x_1}^{x_2} f(x, y) dx$$

Тогда  $\phi$  дифференцируемо на  $[y_1, y_2]$  и

$$\phi'(y) = \int_{x_1}^{x_2} f'_y(x, y) dx$$

*Доказательство.*

$$\frac{\phi(y + \frac{1}{n}) - \phi(y)}{\frac{1}{n}} = \frac{1}{n} \int_{x_1}^{x_2} \left( f\left(x, y + \frac{1}{n}\right) - f(x, y) \right) dx \stackrel{\text{Лагранж}}{=} \int_{x_1}^{x_2} f'_y\left(x, y + \frac{\theta}{n}\right) dx$$

Обозначим

$$g_n(x, y) = f'_y\left(x, y + \frac{\theta}{n}\right)$$

$f'_y$  непрерывно на компакте, поэтому равномерно непрерывна на нём. Воспользуемся этим:

$$\forall \varepsilon \exists \delta \forall n: \frac{1}{n} < \delta \quad \forall x \quad \left| f'_y\left(x, y + \frac{1}{n}\right) - f'_y(x, y) \right| < \varepsilon$$

Отсюда получаем по определению

$$g_n(x, y) \rightrightarrows f'_y(x, y) \text{ на } [x_1, x_2]$$

Воспользуемся теоремой о предельном переходе под знаком интеграла:

$$\int_{x_1}^{x_2} g_n(x, y) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_{x_1}^{x_2} f'_y(x, y) dx$$

Понятно, что вместо последовательности  $\frac{1}{n}$  можно рассматривать любую последовательность  $h_n$ , сходящуюся к 0. То есть

$$\phi'(y) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\phi(y + h_n) - \phi(y)}{h_n} = \int_{x_1}^{x_2} f'_y(x, y) dx$$

■

**Теорема 2.2.4.** (О предельном переходе под знаком производной)  
 $f_n \in C^1(\langle a, b \rangle)$ ,  $f_n \rightarrow f$  поточечно на  $\langle a, b \rangle$ ,  $f'_n \rightrightarrows \varphi$  на  $\langle a, b \rangle$ . Тогда

- $f \in C^1(\langle a, b \rangle)$
- $f' = \varphi$

иначе говоря, коммутативна следующая схема:

$$\begin{array}{ccc} f_n & \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} & f \\ \downarrow d & & \downarrow d \\ f'_n & \xrightarrow{\quad} & \varphi \end{array}$$

*Доказательство.* Пусть  $x_0, x_1 \in \langle a, b \rangle$ , тогда  $f'_n \rightrightarrows \varphi$  на  $[x_0, x_1]$ . Тогда по теореме о предельном переходе под знаком интеграла:

$$\int_{x_0}^{x_1} f'_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_{x_0}^{x_1} \varphi$$

Откуда

$$f(x_1) - f(x_0) \xleftarrow{n \rightarrow +\infty} f_n(x_1) - f_n(x_0) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_{x_0}^{x_1} \varphi$$

То есть

$$\int_{x_0}^{x_1} \varphi = f(x_1) - f(x_0)$$

Тогда  $f$  — первообразная  $\varphi$ .  $\varphi$  непрерывна по теореме Стокса-Зейделя. Получаем, что  $f \in C^1(\langle a, b \rangle)$  и  $f' = \varphi$ . ■

## 2.3 Равномерная сходимость функциональных рядов

**Определение.** Пусть  $u_n: E \rightarrow \mathbb{R}$ , тогда функциональным рядом будем называть  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x)$ .

**Определение.** Функциональный ряд  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x)$  сходится поточечно на  $E$ , если  $S_N(x) \rightarrow S(x)$ .

**Определение.** Функциональный ряд  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x)$  сходится равномерно на  $E$ , если  $S_N(x) \rightrightarrows S(x)$ .

**Замечание.** Из равномерной сходимости следует поточечная.

**Лемма 2.3.1.** (Об остатке функционального ряда)

$$\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) \rightrightarrows 0 \iff R_N(x) \rightrightarrows 0$$

**Доказательство.**  $\sup_{x \in E} |R_{N+1}(x)| = \sup_{x \in E} |S(x) - S_N(x)| \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0$  ■

**Лемма 2.3.2.** (Необходимое условие равномерной сходимости ряда)

$$\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) \rightrightarrows \perp \implies u_n(x) \rightrightarrows 0$$

**Доказательство.**

$$\sup_{x \in E} |u_N(x)| = \sup_{x \in E} |R_N(x) - R_{N+1}(x)| \leq \sup_{x \in E} |R_N(x)| + \sup_{x \in E} |R_{N+1}(x)| \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0$$

■

**Теорема 2.3.3.** (Признак Вейерштрасса равномерной сходимости)

$u_n: E \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\exists c_n: \forall n, x \quad |u_n(x)| \leq c_n$ ,  $\sum_{n=1}^{+\infty} c_n \rightarrow \perp$ , тогда  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) \rightrightarrows \perp$ .

**Доказательство.**

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) \rightrightarrows \perp &\iff R_N(x) \rightrightarrows 0 \iff \sup_{x \in E} |R_N(x)| \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0 \\ &\iff \sup_{x \in E} \left| \sum_{n=N}^{+\infty} u_n(x) \right| \leq \sup_{x \in E} \left| \sum_{n=N}^{+\infty} c_n \right| = \left| \sum_{n=N}^{+\infty} c_n \right| \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0 \end{aligned}$$

■

**Теорема 2.3.4.** (Критерий Больцано-Коши сходимости функционального ряда)

$$\sum_{n=1}^{+\infty} u_n \rightrightarrows S(x) \iff \forall \varepsilon \exists N: \forall m, n > N \quad \sup_{x \in E} |S_n(x) - S_m(x)| < \varepsilon$$

*Доказательство.* Это обычный критерий Больцано-Коши для  $S_N(x) \rightrightarrows S(x)$  ■

**Теорема 2.3.5.** (Стокс-Зейдель)

$u_n: E \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $u_n$  непрерывны в  $x_0 \in E$ ,  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) \rightrightarrows S(x)$ , тогда  $S(x)$  непрерывна в  $x_0$ .

*Доказательство.*  $\forall N$   $S_N(x)$  непрерывна в  $x_0$  как конечная сумма непрерывных функций. Тогда по теореме Стокса-Зейделя для функциональных последовательностей  $S_N(x) \rightrightarrows S(x)$ ,  $S_N(x)$  непрерывны в  $x_0 \implies S(x)$  непрерывна в  $x_0$ . ■

**Теорема 2.3.6.** (Интегрирование функциональных рядов)

$u_n \in C([a, b])$ ,  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) \rightrightarrows S(x)$  на  $[a, b]$ , тогда

$$\int_a^b S(x) dx = \sum_{n=1}^{+\infty} \int_a^b u_n(x) dx$$

иначе говоря:

$$\int_a^b \sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) dx = \sum_{n=1}^{+\infty} \int_a^b u_n(x) dx$$

*Доказательство.*  $S \in C([a, b])$  по теореме Стокса-Зейделя, поэтому интеграл имеет смысл. Применим аналогичную теорему для функциональных последовательностей к  $S_N(x) \rightrightarrows S(x)$ :

$$\int_a^b S_N(x) dx \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} \int_a^b S(x) dx$$

в левой части интеграл и сумму можно переставлять местами (так как сумма конечная). Поэтому

$$\sum_{n=1}^N \int_a^b u_n(x) dx = \int_a^b S_N(x) dx \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} \int_a^b S(x) dx$$

Слева стоят частичные суммы обычного числового ряда. Поэтому по определению сходимости числового ряда имеем:

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \int_a^b u_n(x) dx = \int_a^b S(x) dx$$

■

**Теорема 2.3.7.** (Дифференцирование функциональных рядов)

$u_n \in C^1(\langle a, b \rangle)$ ,  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) \rightarrow S(x)$ ,  $\sum_{n=1}^{+\infty} u'_n(x) \rightrightarrows \varphi(x)$  на  $\langle a, b \rangle$ ,

тогда  $S \in C^1(\langle a, b \rangle)$ , причем  $S'(x) = \varphi(x)$ .

*Доказательство.* Введем функциональную последовательность:  $S_N(x) \rightarrow S(x)$ . Поскольку  $S_N(x)$  — конечные суммы непрерывно дифференцируемых функций,  $S_N(x) \in C^1(\langle a, b \rangle)$ , причем  $S'_N(x) \rightrightarrows \varphi(x)$  на  $\langle a, b \rangle$ . Тогда по аналогичной теореме для функциональных последовательностей получаем требуемое. ■

**Теорема 2.3.8.** (О предельном переходе в функциональных рядах)

$u_n: E \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0$  — предельная точка  $E$ ,  $\forall n \exists a_n = \lim_{x \rightarrow x_0} u_n(x) \in \mathbb{R}$ ,  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x) \rightrightarrows \perp$  на  $E$ .

Тогда  $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n$  сходится, причем  $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n = \lim_{x \rightarrow x_0} \sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x)$ . Иначе говоря:

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \lim_{x \rightarrow x_0} u_n(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \sum_{n=1}^{+\infty} u_n(x)$$

*Доказательство.* Обозначим  $S_N^a = \sum_{n=1}^{+\infty} a_n$ . Проверим критерий Больцано-Коши

для  $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n$ :

$$|S_{n+p}^a - S_n^a| \leq |S_{n+p}^a - S_{n+p}(x)| + |S_{n+p}(x) - S_n(x)| + |S_n(x) - S_n^a|$$

Поскольку  $S_{n+p}^a$  и  $S_{n+p}(x)$  просто конечные суммы, в них спокойно можно переставлять предел и сумму. Поэтому найдется такая окрестность точки  $x_0$ , что  $|S_{n+p}^a - S_{n+p}(x)| < \varepsilon$ . Аналогично поступим с третьим слагаемым. Из критерия Больцано-Коши получаем такое  $N$ , что для  $\forall n, m > N$   $|S_{n+p}(x) - S_n(x)| < \varepsilon$ . Таким образом имеем:

$$|S_{n+p}^a - S_n^a| < 3\varepsilon$$

Мы доказали сходимость ряда  $a_n$ . Проверим второе утверждение теоремы. Положим

$$\tilde{u}(x) = \begin{cases} u_n(x), & x \neq x_0 \\ a_n, & x = x_0 \end{cases}$$

Все  $u_n$ , очевидно, непрерывны в  $x_0$ . Если мы проверим, что  $\sum_{n=1}^{+\infty} \tilde{u}_n(x) \rightrightarrows \tilde{S}(x)$  на  $E \cup \{x_0\}$ , то по теореме Стокса-Зейделя  $\tilde{S}$  будет непрерывной, что означает

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \tilde{S}(x) = \tilde{S}(x_0) = \sum_{n=1}^{+\infty} a_n$$

в левой части  $x_0$  никогда не подставляется в  $\tilde{S}$ , поэтому

$$\lim_{x \rightarrow x_0} S(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \tilde{S}(x) = \tilde{S}(x_0) = \sum_{n=1}^{+\infty} a_n$$

Осталось проверить, что  $\sum_{n=1}^{+\infty} \tilde{u}_n(x) \rightrightarrows \tilde{S}(x)$  на  $E \cup \{x_0\}$ .

$$\sup_{x \in E \cup \{x_0\}} \left| \sum_{n=N}^{+\infty} \tilde{u}_n(x) \right| \leq \sup_{x \in E} \left| \sum_{n=N}^{+\infty} u_n(x) \right| + \sup_{x \in \{x_0\}} \left| \sum_{n=N}^{+\infty} a_n \right| \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0$$

■

**Теорема 2.3.9.** (О предельном переходе в функциональных последовательностях)  
 $f_n: E \subseteq X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $X$  — метрическое пространство,  $x_0$  — предельная точка  $E$ ,  $f_n \rightrightarrows f$ ,  $f_n(x) \xrightarrow{x \rightarrow x_0} A_n$ . Тогда  $\exists \lim_{n \rightarrow +\infty} A_n = A \in \mathbb{R}$ , причем  $f(x) \xrightarrow{x \rightarrow x_0} A$ . Иначе говоря, коммутативна следующая схема:

$$\begin{array}{ccc} f_n(x) & \xrightarrow{\quad} & f(x) \\ \downarrow x \rightarrow x_0 & & \downarrow x \rightarrow x_0 \\ f_n(x_0) & \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} & f(x_0) \end{array}$$

или

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x)$$

**Доказательство.** Введем обозначения:  $u_1 = f_1, u_2 = f_2 - f_1, \dots, a_k = A_k - A_{k-1}$ . Тогда  $\sum_{k=1}^n u_k = f_n$ , то есть  $\sum_{n=1}^{+\infty} u_n \rightrightarrows S(x)$  на  $E$ , причем  $u_k(x) \xrightarrow{x \rightarrow x_0} a_k$ . Пользуясь аналогичной теоремой для функциональных рядов, получаем, что

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = A = \lim_{n \rightarrow +\infty} A_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n a_k = \sum_{k=1}^{+\infty} a_k$$

— сходится. Кроме того имеем, что

$$\sum_{k=1}^{+\infty} a_k = \lim_{x \rightarrow x_0} \sum_{k=1}^{+\infty} u_k(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x)$$

■

**Теорема 2.3.10.** (Признак Дирихле)

Пусть  $a_n, b_n: X \rightarrow \mathbb{R}$ , причем

- $\exists C_a: \forall N \forall x \in X \left| \sum_{i=1}^N a_n(x) \right| \leq C_a$
- $b_n \rightrightarrows 0, \forall x \in X$   $b_n$  монотонна по  $n$ .

Тогда  $\sum_{i=1}^{+\infty} a_n(x) b_n(x) \rightrightarrows \perp$

*Доказательство.* Воспользуемся преобразованием Абеля:

$$\sum_{N \leq k \leq M} a_k b_k = A_N b_M - A_{N-1} b_N + \sum_{k=N}^{M-1} (b_k - b_{k+1}) A_k$$

тогда

$$\begin{aligned} \left| \sum_{k=N}^M a_k(x) b_k(x) \right| &\leq |A_N b_M| + |A_{N-1} b_N| + \left| \sum_{k=N}^{M-1} (b_k - b_{k+1}) A_k \right| \\ &\leq C_a \cdot |b_M| + C_a \cdot |b_N| + C_a \cdot \sum_{k=N}^{M-1} |b_k - b_{k+1}| \end{aligned}$$

Все слагаемые в сумме одного знака. Считая, что  $b_k - b_{k+1} \geq 0$ , имеем:

$$\begin{aligned} \left| \sum_{k=N}^M a_k(x) b_k(x) \right| &\leq C_a \cdot |b_M| + C_a \cdot |b_N| + C_a \cdot \sum_{k=N}^{M-1} (b_k - b_{k+1}) \\ &\leq C_a \cdot (|b_M| + |b_N| + |b_M| + |b_N|) \xrightarrow{N, M \rightarrow +\infty} 0 \end{aligned}$$

■

**Теорема 2.3.11.** (Признак Абеля)

Пусть  $a_n, b_n: X \rightarrow \mathbb{R}$ , причем

- $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n(x) \Rightarrow \perp$
- $\exists C_b: \forall N \forall x \in X |b_n(x)| \leq C_b, \forall x \in X b_n(x)$  монотонна по  $n$ .

Тогда  $\sum_{i=1}^{+\infty} a_n(x) b_n(x) \Rightarrow \perp$

*Доказательство.* Применим критерий Коши к ряду  $a_n$ :

$$\forall \varepsilon \exists N: \forall n > N \forall p \geq 1 \forall x \in X |A_{n,p}(x)| = \left| \sum_{i=n+1}^{n+p} a_i(x) \right| < \varepsilon$$

Воспользуемся преобразованием Абеля:

$$\begin{aligned} \left| \sum_{k=n+1}^{n+p} a_k b_k \right| &\leq |b_{n+p}(x) A_{n,p}(x)| + \left| \sum_{k=n+1}^{n+p-1} (b_{k+1}(x) - b_k(x)) A_{n,k}(x) \right| \\ &\leq C \varepsilon + \varepsilon \sum_{k=n+1}^{n+p-1} |b_{k+1}(x) - b_k(x)| \leq C \varepsilon + \varepsilon |b_{n+p}(x)| + \varepsilon |b_n(x)| \\ &\leq C \varepsilon + 2C_b \varepsilon \end{aligned}$$

Здесь мы воспользовались монотонностью и ограниченностью  $b_n$ .

■