

# Математический анализ. Неофициальный конспект

Лектор: Сергей Витальевич Кисляков  
Конспектировал Леонид Данилевич

IV семестр, весна 2024 г.

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Комплексный анализ</b>	<b>2</b>
1.1	Интеграл от дифференциальной формы вдоль пути . . . . .	3
1.1.1	Про дифференциальные формы . . . . .	3
1.1.2	Про интегрирование . . . . .	3
1.1.3	Интеграл от дифференциальной формы вдоль пути . . . . .	4
1.1.4	Сумма путей . . . . .	4
1.1.5	Альтернативное определение . . . . .	4
1.1.6	(Не)зависимость от параметризации . . . . .	6
1.2	Условия существования первообразной у дифференциальной формы . . . . .	6
1.3	Операторы $\frac{\partial}{\partial z}$ и $\frac{\partial}{\partial \bar{z}}$ . . . . .	9
1.3.1	Связь с голоморфными функциями . . . . .	10
1.4	Гармонические функции . . . . .	18
1.5	Первообразная от замкнутой формы вдоль пути . . . . .	19
1.5.1	Наводящие предположения . . . . .	19
1.5.2	Требуемые свойства . . . . .	19

# Глава 1

## Комплексный анализ

### Лекция I

16 февраля 2024 г.

Пусть  $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ , где открытое  $G \subset \mathbb{C}$ .

**Определение 1.0.1** ( $f$  голоморфна в  $z_0 \in G$ ).  $\exists \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} \stackrel{\text{def}}{=} f'(z_0)$ .

Во втором семестре мы проверяли, что  $f = u + iv$  (где  $u, v : G \rightarrow \mathbb{R}$ ) голоморфна в  $z_0 \iff f$  дифференцируема в вещественном смысле, и выполняются уравнения Коши — Римана:

$$\boxed{\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}}$$

**Определение 1.0.2** ( $f$  аналитична в  $G$ ).  $\forall z_0 \in G : \exists c_j \in \mathbb{C}$ :

$$f(z) = \sum_{j=0}^{\infty} c_j (z - z_0)^j \quad (*)$$

где ряд сходится не только при  $z = z_0$ .

**Теорема 1.0.1.**  $f$  аналитична в  $G \iff f$  голоморфна во всех точках  $G$ .

*Доказательство.*

$\Rightarrow$ . Доказали во втором семестре, несложно.

$\Leftarrow$ . Скоро займёмся, время пришло. □

Из представления (\*) следует, что производная в точке  $z$  считается почленно:  $f'(z) = \sum_{j=1}^{\infty} j c_j (z - z_0)^{j-1}$ . В частности, отсюда получается, что  $f'(z_0) = c_1$ , и вообще  $f^{(n)}(z_0) = j! \cdot c_j$ .

Вскоре мы увидим, что ситуация разительно отличается от вещественной: в вещественном случае были разные классы — дифференцируемые функции,  $C^1$ ,  $C^\infty$ , аналитичные, и множество промежуточных классов.

В комплексном же случае, если функция хотя бы один раз дифференцируема, то окажется, что этого достаточно, чтобы она была не просто дифференцируема, а непрерывно дифференцируема, бесконечно дифференцируема, и даже аналитична.

## 1.1 Интеграл от дифференциальной формы вдоль пути

### 1.1.1 Про дифференциальные формы

**Определение 1.1.1** (Линейная функция  $l : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ ).  $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}, x, y \in \mathbb{R}^n : l(\alpha x + \beta y) = \alpha l(x) + \beta l(y)$ .

**Определение 1.1.2** (Линейная форма на множестве  $G \subset \mathbb{R}^n$ ). Функция двух переменных  $\phi : G \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ , линейная по второму аргументу.

В пространстве  $\mathbb{R}^n$  имеется базис  $(e_j)$ :  $h = e_1 h_1 + \dots + e_n h_n$ .

Тем самым,  $\phi(x, h) = \sum_{j=1}^n \underbrace{\phi(x, e_j)}_{=: g_j(x)} h_j = \sum_{j=1}^n g_j(x) h_j$ .

Введём *базисные линейные формы*  $dx_j(u, h) = h_j$ , игнорирующую первую координату, и возвращающую  $j$ -ю компоненту второго аргумента. Теперь  $\phi(x, h)$  разложилась в сумму  $\sum_{j=1}^n g_j dx_j$ .

*Пример.* Пусть  $f : G \rightarrow \mathbb{C}$  — дифференцируемая в  $G$  функция. Заметим, что её дифференциал  $d_f(x, \_)$  — в точности линейная форма на  $G$ .

При разложении по базису получится  $d_f(x, \_) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j}(x) dx_j$ .

Вскоре мы увидим, что далеко не всякая линейная форма является чьим-то дифференциалом.

Если  $\phi = \sum_{j=1}^n g_j dx_j$  — дифференциал функции  $f$ , то непременно  $g_j = \frac{\partial f}{\partial x_j}$ .

Тот факт, что  $\phi$  является дифференциалом  $f$ , можно сказать наоборот:  $f$  является первообразной  $\phi$ .

### 1.1.2 Про интегрирование

Рассмотрим монотонную функцию  $\Phi : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$ . Как и при определении стилтьесовой длины, будем считать, что  $\Phi$  определена на некотором открытом множестве, содержащем  $\langle a, b \rangle$ . Обозначим за  $l_\Phi$  стилтьесову длину, отвечающую функции  $\Phi$ .

Пускай  $\lambda_\Phi$  — продолжение стилтьесовой длины  $l_\Phi$  по Лебегу — Каратеодори.

Она, как водится, определена на некоторой  $\Sigma$ -алгебре, в которой есть борелевские множества, но измеримы могут быть и какие-то другие множества, зависящие от конкретной функции  $\Phi$ .

*Примеры.*

- Так, функция  $\phi(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$  порождает дельта-меру  $\delta_0$ , относительно которой все множества измеримы.

Кроме того, эта мера сингулярна относительно стандартной меры Лебега.

- Может показаться, что так происходит из-за разрывности  $\phi$ , но это не так.

Рекурсивно определим канторову лестницу  $C : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ :



Построив по данной функции стильесову длину  $\lambda_C$ , мы получим меру, сосредоточенную на канторовом множестве меры нуль.

Её носитель — само канторово множество, так как на всех отрезках вне канторова множества  $\lambda_C$  равна нулю. Она сингулярна относительно стандартной меры Лебега на  $\mathbb{R}$ , и её измеримые множества разительно отличаются от измеримых множеств меры Лебега.

По мере Стильеса можно интегрировать: если  $v$  является  $\lambda_\Phi$  измеримой (в частности, измерима по Борелю и непрерывна), то определён интеграл  $\int_{\langle a, b \rangle} v d\lambda_\Phi$ . Иногда пишут просто  $\int_{\langle a, b \rangle} v d\Phi$ .

Теперь пусть  $I = [a, b]$ , и  $\Psi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  — функция ограниченной вариации. В таком случае  $\Psi = \Phi_1 - \Phi_2$ , где некие  $\Phi_1, \Phi_2$  возрастают. Можно определить знакопеременную меру  $\lambda_\Psi \stackrel{def}{=} \lambda_{\Phi_1} - \lambda_{\Phi_2}$ , понятно, что определение корректно.

### 1.1.3 Интеграл от дифференциальной формы вдоль пути

Пускай  $\gamma : [a, b] \rightarrow G \subset \mathbb{R}^n$  — спрямляемый путь (путь конечной длины). Пускай  $U = \sum_{j=1}^n u_j dx_j$  — дифференциальная форма в области  $G$ . Если не сказано противное, будем считать, что  $u_j$  — непрерывные функции.

**Определение 1.1.3** (Интеграл от  $U$  вдоль пути  $\gamma$ ).  $\int_\gamma U \stackrel{def}{=} \sum_{j=1}^n \int_{[a, b]} u_j(\gamma(t)) d\gamma_j(t)$ .

Здесь  $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$ . Так как путь спрямляем, то все  $\gamma_j$  — ограниченной вариации, каждая порождает свою меру Стильеса, и определение интегрирует композицию  $U \circ \gamma$  по данной мере.

### 1.1.4 Сумма путей

Пускай имеются два отрезка  $[a, c]$  и  $[c, d]$ , и на них заданы пути  $\gamma_1 : [a, c] \rightarrow G$ ,  $\gamma_2 : [c, d] \rightarrow G$ . Предположим, что  $\gamma_1(c) = \gamma_2(c)$ .

Тогда можно устроить путь  $\gamma = \gamma_1 \oplus \gamma_2 : [a, d] \rightarrow G$ ,  $\gamma(t) \stackrel{def}{=} \begin{cases} \gamma_1(t), & t \in [a, c] \\ \gamma_2(t), & t \in [c, d] \end{cases}$ .

*Замечание.* Интеграл аддитивен по множеству:  $\int_{\gamma_1 \oplus \gamma_2} U = \int_{\gamma_1} U + \int_{\gamma_2} U$ .

### 1.1.5 Альтернативное определение

Далее мы не интересуемся никакими чудесами вроде канторовых лестниц, и считаем, что  $\Phi$  такова, что  $\lambda_\Phi$  абсолютно непрерывна относительно стандартной меры Лебега.

А раз так, то по теореме Радона — Никодима  $\exists$  суммируемая  $w : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ , такая, что

$$\lambda_\Phi(e) = \int_e w(x) dx \quad (+)$$

**Факт 1.1.1.** Формула (+) заведомо верна, если  $\Phi$  непрерывно дифференцируема на  $[a, b]$ , тогда  $w = \Phi'$ .

*Доказательство.* Введём меру  $\nu(e) = \int_e \Phi'(x) dx$ , заданную на измеримых по Лебегу множествах.  $\Phi'$  непрерывна, и, следовательно, измерима.

Если  $\langle c, d \rangle \subset [a, b]$ , то  $\nu(\langle c, d \rangle) = \int_{\langle c, d \rangle} \Phi'(x) dx = \Phi(d) - \Phi(c) = l_\Phi(\langle c, d \rangle)$ .

Таким образом, из теоремы единственности, продолжение  $l_\Phi$  по Лебегу — Каратеодори совпадает с  $\int_e \Phi'(x) dx$ .  $\square$

*Замечание.* Утверждение (факт 1.1.1) сохраняет силу, если  $\Phi$  непрерывна и кусочно-непрерывно дифференцируема.

Далее где-то используется  $\Phi$ , а где-то  $\beta$ , надо убедиться, что это везде одно и то же, и заменить. Пускай  $\beta : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  — функция ограниченной вариации, кусочно-непрерывно дифференцируемая:  $\exists a = a_0 < a_1 < \dots < a_k = b$ , такие, что  $\beta$  непрерывно дифференцируема на  $[a_s, a_{s+1}]$  при  $0 \leq s < k$ . Введём  $\rho(e) = \int_e \beta'(x) dx$  — это знакопеременная вещественная мера.

У данной меры возникают (см. разложение Хана) положительная и отрицательная части  $\rho_+(e) \stackrel{def}{=} \int_e (\beta')_+(x) dx$  и  $\rho_-(e) \stackrel{def}{=} \int_e (\beta')_-(x) dx$

Если обозначить за  $\Phi_+(t) = \int_0^t (\beta')_+(x) dx$  и  $\Phi_-(t) = \int_0^t (\beta')_-(x) dx$ , то окажется, что соответствующие меры Стильеса совпадают с  $\rho_+$  и  $\rho_-$ .

Более того,  $\beta = \Phi_+ - \Phi_-$  — получили разложение функции ограниченной вариации в положительную и отрицательную части.

*Замечание.* Это разложение экономнее, чем то, которое было получено ранее — ранее в качестве  $\Phi_+$  выбиралась вариация  $\Phi$ .

Если всё, что написано выше, собрать вместе, то получится

$$\boxed{\int_{[s,t]} v d\Phi = \int_{[s,t]} v(x) \beta'(x) dx}$$

Далее «гладкий» используется, как синоним к непрерывно-дифференцируемому.

**Следствие 1.1.1** (Можно считать определением). Если  $U = \sum_{j=1}^n u_j dx_j$  — дифференциальная форма в  $G$  с непрерывными коэффициентами, а  $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n) : [a, b] \rightarrow G$  — спрямляемый кусочно-гладкий путь, то

$$\int_\gamma U = \sum_{j=1}^n \int_a^b u_j(\gamma(t)) \gamma'_j(t) dt$$

### 1.1.6 (Не)зависимость от параметризации

Пускай  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$  — кусочно-гладкий путь,  $\psi : [c, d] \rightarrow [a, b]$  — гладкий гомеоморфизм.

Теперь  $\tilde{\gamma} = \gamma \circ \psi$  — перепараметризация  $\gamma$

**Лемма 1.1.1.** Для всякой формы  $U$ :

$$\int_{\tilde{\gamma}} U = \pm \int_{\gamma} U$$

Знак  $+$  выбирается, если  $\psi$  возрастает, и  $-$  — если убывает.

*Доказательство.* Предположим, что  $\gamma$  — гладкий путь, иначе применяем к кусочкам гладкости по отдельности.

$$\int_{\tilde{\gamma}} U = \sum_{j=1}^n \int_c^d u_j(\gamma(\psi(t))) \gamma'_j(\psi(t)) \cdot \psi'(t) dt = \left\| \begin{array}{l} \tau = \psi(t) \\ d\tau = \psi'(t) dt \end{array} \right\| = \sum_{j=1}^n \int_{\psi(c)}^{\psi(d)} u_j(\gamma(\tau)) \gamma'_j(\tau) d\tau = \pm \int_{\gamma} U \quad \square$$

Про  $\psi$  также можно считать, что это он не гладкий, а лишь кусочно-гладкий.

Тем самым, можно определить сумму путей для несовпадающих отрезков: для двух путей  $\gamma_1 : [a, b] \rightarrow G, \gamma_2 : [c, d] \rightarrow G$  (при условии  $\gamma_1(b) = \gamma_2(c)$ ) можно один из отрезков-прообразов линейным возрастающим преобразованием перевести в отрезок, соприкасающийся со вторым (например,  $t \mapsto t + (b - c)$ ).

Также есть понятие обратного пути  $\gamma^-(t) = \gamma(a + b - t)$ . Для любой формы  $U$ :

$$\int_{\gamma \oplus \gamma^-} U = \int_{\gamma} U + \int_{\gamma^-} U = \int_{\gamma} U - \int_{\gamma} U = 0$$

## 1.2 Условия существования первообразной у дифференциальной формы

**Теорема 1.2.1.** Если у дифференциальной формы  $U$  в открытом множестве  $G \subset \mathbb{R}^n$  имеется первообразная  $F$ , то для всякого кусочно-гладкого пути  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$

$$\int_{\gamma} U = F(\gamma(b)) - F(\gamma(a))$$

*Доказательство.*  $U = \sum_{j=1}^n g_j dx_j$ , где  $g_j(w) = \frac{\partial}{\partial x_j} F(w)$ . Считаем, что путь гладкий.

$$\int_{\gamma} U = \sum_{j=1}^n \int_a^b \frac{\partial}{\partial x_j} F(\gamma(t)) \gamma'_j(t) dt = \int_a^b \frac{d}{dt} (F \circ \gamma)(t) dt = F(\gamma(b)) - F(\gamma(a))$$

Если же путь всего лишь кусочно-гладкий, то надо разбить отрезок на подотрезки гладкости, и сложить.  $\square$

**Следствие 1.2.1.** Если у дифференциальной формы  $U$  есть первообразная, то её интегралы по всем путям с данными началом и концом, равны.

Оказывается, верно и обратное.

Лекция II  
26 февраля 2024 г.

**Лемма 1.2.1.** Пусть  $G$  — область в  $\mathbb{R}^n$ , тогда любые две её точки можно соединить ломаной (кусочно-линейным путём).

*Доказательство.* Выберем  $x_0 \in G$ , положим  $U = \{y \in G \mid \text{существует ломаная в } G \text{ с началом в } x_0 \text{ и концом в } y\}$ .

Покажем, что  $U$  открыто. Пусть  $y \in U$ , тогда найдётся шарик  $B_\varepsilon(y) \subset G$ , и  $B_\varepsilon(y) \subset U$  — можно добавить одно звено к ломаной  $x_0 \rightsquigarrow y$ .

Покажем, что  $U$  замкнуто. Пусть  $z \in G$  — предельная точка для  $U$ . Найдётся  $B_\varepsilon(z) \subset G$ , так как  $z$  — предельная, то  $\exists y \in B_\varepsilon(z) \cap U$ . Значит,  $z \in U$  — можно добавить одно звено  $y \rightarrow z$ .  $\square$

*Замечание.* Имея кусочно-линейный путь  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$ , соединяющий  $A, B \in G$ , несложно получить бесконечно дифференцируемый путь, соединяющий их:

Пусть  $\gamma_1 : [a-1, b+1] \rightarrow G, \gamma_1(t) = \begin{cases} \gamma(t), & t \in [a, b] \\ \gamma(a), & t \in [a-1, a] \\ \gamma(b), & t \in [b, b+1] \end{cases}$ . Теперь, сворачивая  $\gamma_1$  с аппрокс-

мативной единицей с достаточно большим номером и достаточно малым компактным носителем, получим бесконечно дифференцируемый путь, соединяющий  $A$  и  $B$ .

**Теорема 1.2.2.** Пусть  $\Phi = \sum_{j=1}^n f_j(x) dx_j$  — непрерывная дифференциальная форма в  $G$  (то есть коэффициенты непрерывны в  $G$ ). Следующие условия эквивалентны.

1.  $\int \Phi$  есть первообразная  $F$ , то есть функция  $F \in C^1(G) : dF = \Phi$  (иными словами,  $\forall j : \frac{\partial}{\partial x_j} F = f_j$ ).
2. Для всех кусочно-гладких путей  $\gamma$  с фиксированными началом и концом  $\gamma(a) = \gamma_a, \gamma(b) = \gamma_b$ :  $\int_\gamma \Phi$  не зависит от  $\gamma$  (а только от начала и конца).
3. Для любой кусочно-гладкой петли (то есть замкнутого пути)  $\gamma$  в  $G$ :  $\int_\gamma \Phi = 0$ .

*Доказательство.* Мы уже доказали ранее цепочку импликаций  $(1) \Rightarrow (3) \Rightarrow (2)$ . Далее доказываем  $(2) \Rightarrow (1)$ .

Предъявим кандидат в первообразную. Зафиксируем  $x_0 \in G$ , выберем  $x \in G$ , пусть  $\gamma$  — произвольный кусочно-гладкий путь с началом в  $x_0$  и концом в  $x$ . Определим  $F(x) \stackrel{\text{def}}{=} \int_\gamma \Phi$ . Согласно посылке,  $F$  корректно определена — не зависит от выбора пути.

Покажем, что частные производные  $F$  существуют, и равны  $f_j$ . Тогда они получатся непрерывными, то есть  $F$  — дифференцируемой, и окажется, что  $F$  — первообразная  $\Phi$ .

Пусть  $e_1, \dots, e_n$  — стандартные базисные орты в  $\mathbb{R}^n$ . Рассмотрим  $\frac{F(x+te_j) - F(x)}{t}$ .

При малых  $t$ : отрезок между  $x$  и  $x+te_j$  лежит внутри  $G$ . Пусть  $\gamma_1$  — путь, соединяющий  $x_0$  и  $x$ ,  $l$  — отрезок от  $x$  до  $x+te_j$ .

$$\frac{F(x+te_j) - F(x)}{t} = \frac{1}{t} \left( \int_{\gamma_1 \oplus l} \Phi - \int_{\gamma_1} \Phi \right) = \frac{1}{t} \int_l \Phi = \frac{1}{t} \int_0^t f_j(x + \tau e_j) d\tau \xrightarrow{t \rightarrow 0} f_j(x) \quad \square$$

**Определение 1.2.1** (Прямоугольник на плоскости). Множество вида  $[a, b] \times [c, d] \subset \mathbb{R}^2$ .

Область  $G$  на плоскости будем называть *удобной*, если  $\exists x_0 \in G : \forall y \in G : \exists$  прямоугольник  $P \subset G$ , содержащий точки  $x$  и  $y$ .

*Примеры* (Удобные области).

- $\text{Int } Q$ , если  $Q$  — прямоугольник. В качестве центра  $x_0$  подойдёт любая точка.



- $B_r(x_0) = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid |x - x_0| < r\}$ . В качестве центра  $x_0$  стоит взять центр, иначе не получится:



**Определение 1.2.2** (Ориентированная граница прямоугольника  $P$ ). Петля  $\gamma$ , обходящая границу  $P = [a, b] \times [c, d]$  против часовой стрелки, то есть вот так:



$$\gamma = \gamma_1 \oplus \gamma_2 \oplus \gamma_3 \oplus \gamma_4.$$

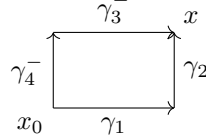
Для прямоугольника  $P$  будем обозначать за  $\partial P$  в зависимости от контекста либо границу  $P$ , как топологического подмножества  $\mathbb{R}^2$ , либо путь, обходящий границу  $P$  против часовой стрелки.

**Следствие 1.2.2** (Дополнение к (теорема 1.2.2)). Если  $G$  — удобная область на плоскости, то к трём эквивалентным условиям (теорема 1.2.2) можно добавить

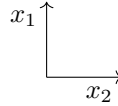
$$4. \forall P \subset G : \int_{\partial P} \Phi = 0.$$

*Доказательство.* (3)  $\Rightarrow$  (4) ясно, докажем (4)  $\Rightarrow$  (1).

Пусть  $x_0 \in G$  — центр удобной области, определим  $F(x) = \int_{\delta} \Phi$ , где  $\delta$  — это либо  $\delta_1 := \gamma_1 \oplus \gamma_2$  либо  $\delta_2 := \gamma_4^- \oplus \gamma_3^-$  (вне зависимости от выбора  $\delta$  получится одно и то же).



Далее, чтобы проверить  $\frac{\partial}{\partial x_1} F = f_1$  и  $\frac{\partial}{\partial x_2} F = f_2$ , воспользуемся подходящим представлением: пусть орт выглядит так:



тогда для проверки  $\frac{\partial}{\partial x_1} F = f_1$  удобно воспользоваться определением  $F$  через  $\delta_1$ , для проверки  $\frac{\partial}{\partial x_2} F = f_2$  — определением через  $\delta_2$ . Далее повторяем рассуждение из (теорема 1.2.2).  $\square$

Пусть  $\Phi = \sum_{j=1}^n f_j(x) dx_j$  — непрерывная дифференциальная форма в области  $G \subset \mathbb{R}^n$ .

**Определение 1.2.3** (Форма  $\Phi$  точна). Существует первообразная  $F$  в  $G$ :  $dF = \Phi$ .

**Определение 1.2.4** (Форма  $\Phi$  замкнута). Форма  $\Phi$  локально точна ( $\forall x_0 \in G : \exists U \ni x_0 : \Phi|_U$  точна).

Понятно, что точная форма замкнута, но точность из замкнутости не следует: чуть позднее мы определим  $dz$ , и покажем, что  $\frac{dz}{z}$  — замкнутая, но не точная форма на  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$

**Теорема 1.2.3.** Пусть  $\Phi$  — дифференциальная форма в области  $G \subset \mathbb{R}^n$ . Следующие условия эквивалентны:

1.  $\Phi$  замкнута.

2.  $\forall x_0 \in G : \exists V \ni x_0 : \forall$  кусочно-гладкого замкнутого пути  $\gamma$  с носителем в  $V$ :  $\int_{\gamma} \Phi = 0$ .

Если  $n = 2$ , то дополнительно появляются ещё два условия:

3.  $\forall z \in G : \exists V_z \subset G : \forall P \subset V_z : \int_{\partial P} \Phi = 0$ .

4.  $\forall P \subset G : \int_{\partial P} \Phi = 0$ .

*Доказательство.* Докажем, что  $(3) \Rightarrow (4)$ , остальное уже доказано выше.

Заметим, что границу прямоугольника  $P$  можно представить, как сумму границ четырёх прямоугольников вдвое меньшего диаметра:



Таким образом, чтобы доказать, что интеграл по границе большого прямоугольника  $P$  нулевой, разобьём его на достаточно маленькие прямоугольники, по ним-то интеграл нуль. Чтобы это формализовать, вспомним лемму Лебега о покрытии:

**Теорема 1.2.4** (Лемма Лебега). Пусть  $K$  — компакт в метрическом пространстве,  $\{U_j\}_{j \in J}$  — открытое покрытие компакта  $K$ . Тогда  $\exists \delta > 0 : \forall A \subset K : \text{diam } A < \delta \Rightarrow \exists j \in J : A \subset U_j$ .

Применяя лемму Лебега для покрытия  $P$  окрестностями  $\{V_z\}_{z \in P}$ , получим такое число  $\delta$ . Теперь надо разбить границу прямоугольника  $P$  в сумму границ прямоугольников диаметра меньше  $\delta$ , а посылка теоремы говорит, что интеграл по ним уже нуль.  $\square$

### 1.3 Операторы $\frac{\partial}{\partial z}$ и $\frac{\partial}{\partial \bar{z}}$

Как известно,  $\mathbb{C} = \{x + iy | x, y \in \mathbb{R}\}$ , то есть  $\forall z \in \mathbb{C} : z = x + iy$ , аналогично  $\bar{z} = x - iy$ .

Рассмотрим  $z$  и  $\bar{z}$ , как функции  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{C}$ ,  $(x, y) \mapsto x \pm iy$ . Теперь  $dz = dx + i dy$  и  $d\bar{z} = dx - i dy$  образуют базис в пространстве дифференциальных форм (тех, которые не зависят от точки), обратное преобразование выглядит так:

$$\begin{cases} dx = \frac{dz + d\bar{z}}{2} \\ dy = \frac{dz - d\bar{z}}{2i} \end{cases}$$

Рассмотрим форму  $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{C}$ ,  $\Phi(x, y) = \alpha(x, y) dx + \beta(x, y) dy$ . Перепишем её в новом базисе:

$$\Phi(x, y) = \frac{\alpha(x, y)}{2} (dz + d\bar{z}) + \frac{\beta(x, y)}{2i} (dz - d\bar{z}) = \frac{\alpha(x, y) - i\beta(x, y)}{2} dz + \frac{\alpha(x, y) + i\beta(x, y)}{2} d\bar{z}$$

Теперь пусть  $\Phi$  — точная форма, то есть  $\Phi = dF$ , и тогда  $\alpha(x, y) = \frac{\partial F}{\partial x}(x, y)$  и  $\beta(x, y) = \frac{\partial F}{\partial y}(x, y)$ . Теперь

$$dF = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial F}{\partial x} - i \frac{\partial F}{\partial y} \right) dz + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial F}{\partial x} + i \frac{\partial F}{\partial y} \right) d\bar{z}$$

**Определение 1.3.1** ( $\frac{\partial F}{\partial z}$ ). Коэффициент, стоящий перед  $dz$ , то есть  $\frac{1}{2} \left( \frac{\partial F}{\partial x} - i \frac{\partial F}{\partial y} \right)$ .

**Определение 1.3.2** ( $\frac{\partial F}{\partial \bar{z}}$ ). Коэффициент, стоящий перед  $d\bar{z}$ , то есть  $\frac{1}{2} \left( \frac{\partial F}{\partial x} + i \frac{\partial F}{\partial y} \right)$ .

Иначе говоря, мы ввели операторы  $\frac{\partial}{\partial z} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right)$  и  $\frac{\partial}{\partial \bar{z}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right)$  так, что

$$dF = \frac{\partial}{\partial z} F dz + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} F d\bar{z}$$

### 1.3.1 Связь с голоморфными функциями

Пусть  $F = u + iv$ , где  $u, v : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ . Запишем

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} + i \left( \frac{\partial u}{\partial y} + i \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + i \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right)$$

В правой части равенства получились выражения из уравнений Коши — Римана.

**Факт 1.3.1.** Вещественные функции  $u, v$  удовлетворяют уравнениям Коши — Римана  $\iff \frac{\partial(u+iv)}{\partial \bar{z}} \equiv 0$ .

**Факт 1.3.2.**  $F$  голоморфна  $\iff dF = \frac{\partial F}{\partial z} dz$ . При этом  $\frac{\partial F}{\partial z}$  есть производная  $F$  по комплексному аргументу.

*Доказательство.* Функция дифференцируема по комплексному аргументу  $\iff$  её дифференциал — умножение на комплексное число.  $\square$

В основном нас будут интересовать дифференциальные формы вида  $\phi(z) dz$ , где  $\phi$  — произвольная функция.

Выясним, когда у формы  $\phi(z) dz = \phi(z) dx + i\phi(z) dy$  имеется первообразная, то есть функция  $g : \frac{\partial g}{\partial x} = \phi, \frac{\partial g}{\partial y} = i\phi$ . Заметим, что  $\frac{\partial g}{\partial z} = \frac{1}{2}(\phi - i(i\phi)) = \phi$  и  $\frac{\partial g}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2}(\phi + i(i\phi)) = 0$ .

**Утверждение 1.3.1.** Форма  $\phi dz$  имеет первообразную  $g \iff g$  голоморфна, и  $g' = \phi$ .

**Теорема 1.3.1** (Коши). Если  $g : G \rightarrow \mathbb{C}$  — голоморфная функция (область  $G \subset \mathbb{C}$ ), то форма  $g(z) dz$  замкнута.

*Доказательство.* Потом.  $\square$

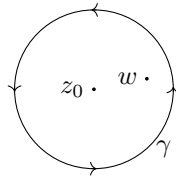
*Контрпример* (Глобально первообразной может не быть). Пусть  $G = \mathbb{C} \setminus \{0\}, g : G \rightarrow \mathbb{C}, g : z \mapsto \frac{1}{z}$ .

По теореме Коши у  $g$  имеется локальная первообразная — комплексный логарифм — но глобально определить не получится. Пусть  $\Gamma = \partial\mathbb{T}$  — комплексная окружность, ориентируем её против часовой стрелки, а именно, рассмотрим стандартный обход окружности  $\alpha : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{C}, \alpha : \phi \mapsto e^{i\phi}$ . Теперь убедимся, что форма не точна:

$$\int_{\alpha} \phi = \int_{\alpha} \frac{dz}{z} = \int_0^{2\pi} \frac{(e^{it})'}{e^{it}} dt = \int_0^{2\pi} dt = 2\pi i \neq 0$$

Для будущих применений также определим ориентированную против часовой стрелки границу  $B_r(z_0)$ , это путь  $\beta(t) = z_0 + re^{it}$  для  $t \in [0, 2\pi]$ .

*Пример.* Пусть  $z_0, w \in \mathbb{C}, r \in \mathbb{R}_{>0}, |w - z_0| \neq r$ , пусть путь  $\gamma$  обходит границу  $B_r(z_0)$  против часовой стрелки:



Тогда, оказывается, (посчитаем чуть позже):

$$\int_{\gamma} \frac{dz}{z-w} = \begin{cases} 0, & |z-w| > r \\ 2\pi i, & |z-w| < r \end{cases} \quad (\circ)$$

Грубой силой этот интеграл посчитать непросто, так как  $w$  находится где угодно — внутри или снаружи круга — а интеграл, оказывается, зависит только от этих двух альтернатив.

**Теорема 1.3.2** (Основная оценка интеграла вдоль пути). Пускай  $\Phi = \sum_{j=1}^n f_j dx_j$  — непрерывная дифференциальная форма в области  $G \subset \mathbb{R}^n$ , а  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$  — кусочно-гладкий путь,  $K := \text{Im}(\gamma) \subset G$ .

$$\text{Тогда } \left| \int_{\gamma} \Phi \right| \leq \underbrace{\sup_{x \in K} \left( \sum_{j=1}^n |f_j(x)|^2 \right)^{1/2}}_{=: A} \cdot l(\gamma).$$

*Доказательство.* Считаем, что  $\gamma$  — гладкий путь, иначе нужно разбить на кусочки гладкости.

$$\left| \int_{\gamma} \Phi \right| = \left| \int_a^b \sum_{j=1}^n f_j(\gamma(t)) \gamma'_j(t) dt \right| \stackrel{\text{КБШ}}{\leq} \int_a^b \left( \sum_{j=1}^n |f_j(\gamma(t))|^2 \right)^{1/2} \cdot \left( \sum_{j=1}^n |\gamma'_j(t)|^2 \right)^{1/2} dt \leq A \cdot \underbrace{\int_a^b \left( \sum_{j=1}^n |\gamma'_j(t)|^2 \right)^{1/2} dt}_{l(\gamma)}$$

□

## Лекция III

1 марта 2024 г.

Рассмотрим дифференциальную форму  $\Phi = F(z) dz$ , где  $F$  — непрерывная функция в  $G \subset \mathbb{C}$ . Пусть  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$  — плоский путь.

Расписав  $\Phi(z) = F(z) dx + iF(z) dy$  и применив основную оценку интеграла вдоль пути, получаем

$$\left| \int_{\gamma} \Phi \right| \leq \max_{z \in K} \sqrt{|F(z)|^2 + |F(z)|^2} \cdot l(\gamma) = \sqrt{2} \max_{z \in K} |F(z)| \cdot l(\gamma)$$

Эта оценка вызывает некоторую неудовлетворённость: кажется, что  $\sqrt{2}$  здесь лишний. И это действительно правда: можно расписать интеграл аккуратнее.

Пусть  $\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2$ , тогда по определению

$$\int_{\gamma} \Phi = \int_a^b F(\gamma(t)) \cdot \gamma'_1(t) + iF(\gamma(t)) \cdot \gamma'_2(t) dt = \int_a^b F(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) dt$$

Таким образом, интеграл от комплексной формы вдоль пути имеет более простое представление, и оно легко поддаётся более плотной оценке:

$$\left| \int_{\gamma} \Phi \right| \leq \int_a^b |F(\gamma(t))| \cdot |\gamma'(t)| dt \leq \max_{z \in K} |F(z)| \underbrace{\int_a^b |\gamma'(t)| dt}_{l(\gamma)}$$

Посчитаем анонсированный на предыдущей лекции интеграл (о). Пусть  $z_0, w \in \mathbb{C}$ ,  $r > 0$ .

- Сначала рассмотрим случай  $|w - z_0| < r$ . Заметим, что, согласно основной оценке интеграла, если коэффициенты равномерно стремятся к какому-то значению и интегралы ограничены, то предельный интеграл тоже сходится.

Запись ниже  $\int_{|z-z_0|=r}$ , и вообще все аналогичные записи, которые встретятся в дальнейшем, по умолчанию означают, что граница соответствующего множества (в данном случае — круга) обходится стандартным образом, то есть против часовой стрелки.

$$\begin{aligned} \int_{|z-z_0|=r} \frac{dz}{z - z_0 - (w - z_0)} &= \int_{|z-z_0|=r} \frac{1}{z - z_0} \frac{1}{1 - \frac{w-z_0}{z-z_0}} dz = \\ &= \int_{|z-z_0|=r} \frac{1}{z - z_0} \left( 1 + \frac{w - z_0}{z - z_0} + \left( \frac{w - z_0}{z - z_0} \right)^2 + \dots \right) dz \quad (\equiv) \end{aligned}$$

На слагаемые из ряда имеется равномерная по  $z$  оценка:  $\left| \frac{w-z_0}{z-z_0} \right| \leq \frac{|w-z_0|}{r} < 1$ , и по теореме Вейерштрасса функциональный ряд сходится. Значит, сумму можно вынести из-под интеграла

$$(\equiv) \int_{|z-z_0|=r} \frac{1}{z - z_0} dz + \sum_{j=1}^{\infty} \int_{|z-z_0|=r} \frac{(w - z_0)^j}{(z - z_0)^{j+1}} dz \quad (\equiv)$$

Первое слагаемое мы умеем брать, а у каждого слагаемого из остальной суммы имеется первообразная:  $\frac{1}{(z-z_0)^{j+1}} = -\frac{1}{j} \left( \frac{1}{(z-z_0)^j} \right)'$

$$(\equiv) \int_{|z-z_0|=r} \frac{1}{z - z_0} dz = \int_0^{2\pi} \frac{rie^{it}}{re^{it}} dt = 2\pi i$$

- Теперь разберёмся со случаем  $|w - z_0| > r$ .

$$\int_{|z-z_0|=r} \frac{dz}{z - z_0 - (w - z_0)} = -\frac{1}{w - z_0} \int_{|z-z_0|=r} \frac{dz}{1 - \frac{z-z_0}{w-z_0}} = -\frac{1}{w - z_0} \sum_{j=0}^{\infty} \int_{|z-z_0|=r} \frac{(z - z_0)^j}{(w - z_0)^j} dz$$

Аналогично предыдущему случаю, ряд сходится абсолютно, поэтому сумму опять можно вынести из под интеграла, и в данном случае всё ещё проще: каждое слагаемое имеет первообразную, там нет отрицательных степеней  $z$ , поэтому вся сумма обращается в нуль.

Пусть  $\Phi = f_1 dx_1 + \dots + f_n dx_n$  — непрерывная дифференциальная форма в некоторой области  $G \subset \mathbb{R}^n$ .

**Теорема 1.3.3.** Если все функции  $f_j \in C^1$ , то следующие условия эквивалентны:

- $\Phi$  замкнута.
- $\forall 1 \leq i, j \leq n : \frac{\partial f_i}{\partial x_j} = \frac{\partial f_j}{\partial x_i}$  — «накрест взятые частные производные равны».

*Доказательство.*

$\Rightarrow$  Выберем  $x \in G$ , так как форма замкнута, то  $\exists U \ni x : \Phi$  имеет первообразную  $F : U \rightarrow \mathbb{R}$ . Тем самым,  $f_i = \frac{\partial F}{\partial x_i}$ , и так как  $f_i \in C^1$ , то действительно  $\frac{\partial f_j}{\partial x_i} = \frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 F}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ .

$\Leftarrow$  Сначала приведём доказательство случая  $n = 2$ . В таком случае  $\Phi = f dx + g dy$ .

Согласно посылке,  $h := \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\partial g}{\partial x}$ . Кстати, равенство слева равносильно одному из эквивалентных уравнений Коши — Римана.

Рассмотрим произвольный  $P = [a, b] \times [c, d] \subset G$ , и докажем, что  $\int_{\partial P} \Phi = 0$ .



То, что мы увидим сейчас, является первым заходом на *формулу Остроградского — Гаусса*. Функция  $h$  непрерывна, и можно записать на неё интеграл Лебега:  $\int_P h(x, y) dx dy$ . Теперь, применяя теорему Фубини, раскладываем интеграл в сумму повторных:

$$\begin{aligned} \int_{\gamma_3^-} f(\_, d) dx + \int_{\gamma_1^-} f(\_, c) dx &= \int_a^b [f(x, d) - f(x, c)] dx = \int_a^b \left( \int_c^d \frac{\partial f}{\partial y} dy \right) dx = \\ &= \int_P h(x, y) dx dy = \\ &= \int_c^d \left( \int_a^b \frac{\partial g}{\partial x} dx \right) dy = \int_c^d [g(b, y) - g(a, y)] dy = \int_{\gamma_2} g(b, \_) dy + \int_{\gamma_4} g(a, \_) dy \end{aligned}$$

Итого,  $\int_{\gamma_3^-} f(\_, d) dx + \int_{\gamma_1^-} f(\_, c) dx = \int_{\gamma_2} g(b, \_) dy + \int_{\gamma_4} g(a, \_) dy$ , откуда действительно  $\int_{\gamma} \Phi = 0$ .

⇐ Теперь приведём альтернативное доказательство индукцией по  $n$ .

База: Случай  $n = 1$  тривиален: теорема Ньютона — Лейбница говорит, что у непрерывной функции есть первообразная.

Переход: Пусть  $n > 1$ , и для  $n - 1$  теорема доказана. Рассмотрим  $a \in G$ , и возьмём прямоугольный параллелепипед со сторонами, параллельными осям координат  $P$  такой, что  $a \in \text{Int } P$ . Докажем, что на  $P$  у  $\Phi$  есть первообразная.

Построим  $g(x_1, \dots, x_n) = \int_{a_1}^{x_1} f_1(t, x_2, \dots, x_n) dt$ . Обозначим  $\phi_j := \frac{\partial g}{\partial x_j}$ . Заметим, что  $\phi_1 = \frac{\partial g}{\partial x_1} = f_1$ .

Теперь рассмотрим форму  $\Psi(x_1, \dots, x_n) = \phi_1 dx_1 + \dots + \phi_n dx_n$ . Эта форма имеет первообразную  $g$  на параллелепипеде  $P$ .

Теперь посмотрим на  $\Phi - \Psi =: h_1 dx_1 + \dots + h_n dx_n$ . По построению  $h_1 = 0$ . По условию накрест взятые частные производные равны у  $\Phi$ , и они равны у  $\Psi$ , так как у неё есть первообразная. Значит, это же верно и для разности, в частности,  $\frac{\partial h_i}{\partial x_1} = \frac{\partial h_1}{\partial x_i} = 0$ . Иными словами,  $\forall i : h_i$  не зависит от  $x_1$ .

А раз так, то на  $\Phi - \Psi$  можно смотреть, как на форму  $(n - 1)$ -й переменной, и применить индукционное предположение.

*Замечание.* Тут есть некоторый обман: производные  $\frac{\partial \phi_i}{\partial x_j}$  могут просто не существовать.

Попробуем обойти его так: пусть  $\beta \in C^\infty$ , с компактным носителем. Выберем аппроксимативную единицу  $\beta_t(x) = \frac{1}{t^n} \beta(\frac{x}{t})$ .

Назначим  $f_k^{(t)} = f_k * \beta_t$ ,  $f_k^{(t)} \xrightarrow[t \rightarrow 0]{} f_k$ .

Далее у формы  $\Phi^{(t)}$  коэффициенты  $h_k^{(t)}$  не зависят от  $x_1$ . А раз они равномерно стремятся к  $h_k$ , то и они не зависят от  $x_1$ . Это было произнесено устно, я наверняка что-то не так записал.

□

**Теорема 1.3.4** (Коши). Пусть  $F$  — голоморфная функция в открытом множестве  $G \subset \mathbb{C}$ . Тогда дифференциальная форма  $F(z) dz$  замкнута, то есть локально  $\exists S : S'(z) = F(z)$ .

*Замечание.* Теорема совсем проста, если заранее предположить, что  $F'(z)$  непрерывна (а так в итоге и должно получиться, так как  $F$  — аналитична (теорема 1.0.1)). В таком случае имеется следующее более простое доказательство.

*Доказательство.* Надо проверить второе уравнение Коши — Римана:  $\forall z \in \mathbb{C} : \frac{\partial F}{\partial y}(z) = i \frac{\partial F}{\partial x}(z)$  (первое выполнено, так как накрест-взятые частные производные равны).

Поскольку  $F(z) dz = F(z) dx + iF(z) dy$ , утверждение эквивалентно (согласно (теорема 1.3.3)) тому, что  $\forall z \in \mathbb{C} : \frac{\partial F}{\partial y}(z) = i \frac{\partial F}{\partial x}(z)$ . Пусть  $F(z) = u(x, y) + iv(x, y)$ .

$$\frac{\partial u}{\partial y} + i \frac{\partial v}{\partial y} = i \left( \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

то есть  $\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}$  и  $\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial x}$ . **Я вообще не понял, что произошло.**

□

Теперь докажем теорему Коши вне предположения непрерывности производной.

*Доказательство.* Докажем от противного: пусть форма  $F(z) dz$  не замкнута,  $\exists P_0 \subset G : \alpha = \int_{\partial P_0} F(z) dz \neq 0$ .

Будем потихонечку делить этот прямоугольник на четыре равные части: пусть  $P_0 = Q_1 \cup Q_2 \cup Q_3 \cup Q_4$ .



Модуль интеграла по границе по крайней мере одного из  $Q_i$  хотя бы  $\frac{|\alpha|}{4}$ . Назовём этот прямоугольник  $P_1$ , и продолжим процесс. Получим систему вложенных замкнутых прямоугольников  $P_0 \supset P_1 \supset \dots$ , таких, что  $\left| \int_{\partial P_k} F(z) dz \right| \geq \frac{|\alpha|}{4^k}$ . При этом  $l(\partial P_k) = 2^{-k} l(\partial P_0)$ , и  $\text{diam}(P_k) = 2^{-k} \text{diam}(P_0)$ .

Имеется ровно одна точка  $z_0$  в пересечении  $\bigcap_{k \geq 0} P_k$ . Воспользуемся условием того, что  $F$  голоморфна в точке  $z_0$ :  $F(z) = F(z_0) + F'(z_0)(z - z_0) + \underbrace{\psi(z)}_{o(|z - z_0|)}$

Зафиксируем  $\varepsilon > 0$ .  $\exists \delta > 0 : |z - z_0| < \delta \Rightarrow |\psi(z)| \leq \varepsilon |z - z_0|$ . Пусть  $k$  настолько велико, что  $\text{diam } P_k < \delta$ .

$$\int_{\partial P_k} F(z) dz = \int_{\partial P_k} [F(z_0) + F'(z_0)(z - z_0)] dz + \int_{\partial P_k} \psi(z) dz$$

Первый интеграл обнуляется, так как это линейная функция по  $z$ , у неё есть первообразная. Оценивая второй интеграл, получаем

$$\frac{|\alpha|}{4^k} \leq \left| \int_{\partial P_k} \psi(z) dz \right| \leq \varepsilon \text{diam } P_k \cdot l(\partial P_0) = \varepsilon \cdot 2^{-k} \text{diam } P_0 \cdot 2^{-k} l(\partial P_0) = 4^{-k} \varepsilon \cdot \text{diam } P_0 \cdot l(\partial P_0)$$

Выбирая довольно маленький  $\varepsilon$ , получаем, что  $|\alpha|$  меньше любого положительного числа.

□

**Теорема 1.3.5** (Об устранимой особенности замкнутой дифференциальной формы). Пусть  $\Phi = f dx + g dy$  — непрерывная дифференциальная форма в области  $G \subset \mathbb{C}$ .

Если  $z_0 \in G$ , и  $\Phi$  замкнута в  $G \setminus \{z_0\}$ , то  $\Phi$  замкнута в  $G$ .

*Доказательство.* Докажем, что  $\forall P \subset G : \int_{\partial P} \Phi = 0$ . Рассмотрим случаи.

- Если  $z_0 \notin P$ , то интеграл нуль по условию.
- Если  $z_0 \in \text{Int } P$ , то данный случай сводится к следующему: разобьём прямоугольник на два так, чтобы  $z_0$  оказалось на границе:



- Если  $z_0 \in \partial P$ , то отступим на  $\varepsilon$ , интеграл по границе  $P_\varepsilon$  будет нулём:  $\int_{\partial P_\varepsilon} \Phi = 0$ .

Заметим, что  $\int_{\partial P_\varepsilon} \Phi \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\partial P} \Phi$ , так как коэффициенты дифференциальной формы равномерно непрерывны в некоторой окрестности  $P$ . Значит,  $\int_{\partial P} \Phi = 0$ .

□

**Теорема 1.3.6** (Малая интегральная формула Коши). Пусть  $f$  — голоморфна в области  $G$ ,  $B = B(z_0, r)$  — круг,  $\overline{B} \subset G$ . Тогда  $\forall z \in B$ :

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial B} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta$$

*Доказательство.* Докажем для некоего фиксированного  $z \in B$ .

Рассмотрим функцию  $g(\zeta) = \frac{f(z) - f(\zeta)}{z - \zeta}$ .  $g$  голоморфна в области  $G \setminus \{z\}$ . Тем самым,  $g(\zeta) d\zeta$  — замкнутая форма в  $G \setminus \{z\}$ , а по теореме об устранимой особенности  $g(\zeta) d\zeta$  замкнута в  $G$  (определим по непрерывности  $g(z) := f'(z)$ ).

Но так как круг — удобная область, то у  $g$  имеется первообразная в некотором круге  $B(z_0, r(1 + \varepsilon))$  (где  $\varepsilon > 0$  настолько мал, что  $B(z_0, r(1 + \varepsilon)) \subset G$ ),

Тем самым,  $\int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(z) - f(\zeta)}{z - \zeta} d\zeta = 0$ , откуда

$$\int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(z)}{\zeta - z} d\zeta = f(z) \cdot \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{1}{\zeta - z} d\zeta = 2\pi i \cdot f(z)$$

□

**Следствие 1.3.1** (Теорема Коши). Если функция голоморфна в области  $G \subset \mathbb{C}$ , то  $\forall z_0 \in G$  функция  $f$  (в некоторой окрестности) раскладывается в некоторый степенной ряд  $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (z - z_0)^n$ , причём радиус сходимости хотя бы  $\text{dist}(z_0, \partial G)$ .



*Доказательство.* Пусть  $r \in (0, \text{dist}(z_0, \partial G))$ . Рассмотрим  $B = B_r(z_0)$ . Так как  $B \subset G$ , то для точки  $z \in B$  получаем

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0) - (z - z_0)} d\zeta = \\ &= \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{1}{\zeta - z_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{z - z_0}{\zeta - z_0}} f(\zeta) d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \sum_{j=0}^{\infty} (z - z_0)^j \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{j+1}} d\zeta \end{aligned}$$

Абсолютная равномерная сходимость в круге радиус  $r$  при  $r < \text{dist}(z_0, \partial G)$  имеется по тем же причинам, что и при доказательстве (о).

Таким образом, мы получили степенной ряд, и так как коэффициенты степенного ряда, раз определены, не зависят от радиуса круга ( $c_j = \frac{f^{(j)}(z_0)}{j!}$ ), то радиус сходимости данного ряда хотя бы  $\text{dist}(z_0, \partial G)$ .  $\square$

## Лекция IV

12 марта 2024 г.

*Замечание.* Интегральную форму Коши можно спокойно дифференцировать: так,

$$\frac{d}{dz} f(z) = \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta \right) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z)^2} d\zeta$$

В общем случае

$$\frac{d^k}{dz^k} f(z) = \frac{d^k}{dz^k} \left( \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta \right) = \frac{k!}{2\pi i} \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z)^{k+1}} d\zeta$$

**Определение 1.3.3** (Целая (entire) функция). Голоморфная функция, заданная в  $\mathbb{C}$ .

Выберем  $z_0 = 0$ . Согласно (следствие 1.3.1), получаем  $f(z) = \sum_{j=0}^{\infty} c_j z^j$ , где  $c_j = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta| = r} \frac{f(\zeta)}{\zeta^{j+1}} d\zeta$ , причём имеется абсолютная сходимость везде в  $\mathbb{C}$ .

**Теорема 1.3.7.** Если  $f$  целая, и  $|f(z)| = \mathcal{O}(z^N)$  при  $|z| \xrightarrow{z \rightarrow \infty} \infty$ , то  $f$  — многочлен степени не более  $N$ .

*Доказательство.* Из определения  $\mathcal{O}$ :  $\exists C, a \in \mathbb{R} : |f(z)| \leq C|z|^n$  при  $|z| > a$ .

Выберем  $r > a$ , и оценим:  $|c_j| = \left| \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{f(re^{i\theta})}{re^{i\theta}} i e^{i\theta} d\theta \right| \leq \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Cr^N}{r^j} d\theta = \frac{Cr^N}{r^j}$ . Получается, при  $j > N : |c_j|$  меньше любого наперёд заданного положительного числа.  $\square$

**Следствие 1.3.2** (Теорема Лиувилля). Ограниченная целая функция постоянна.

**Следствие 1.3.3** (Основная теорема алгебры).  $\forall p \in \mathbb{C}[z] : \deg p > 0 \Rightarrow \exists z_0 \in \mathbb{C} : p(z_0) = 0$ .

*Доказательство.* Пусть  $p(z) = \sum_{j=0}^N c_j z^j$ , где  $N > 0$  и  $c_N \neq 0$ .

Пойдём от противного: пусть  $\forall z \in \mathbb{C} : p(z) \neq 0$ .

Рассмотрим  $f(z) := \frac{1}{p(z)}$ .

- С одной стороны, это целая функция:  $\frac{d}{dz} f(z) = -\frac{p'(z)}{p(z)^2}$ .

- С другой стороны,  $f$  ограничена: оценим  $|p(z)| \geq |z|^N \left( |c_N| - \sum_{j=0}^{N-1} \frac{|c_j|}{|z|^{N-j}} \right)$ , откуда для достаточно больших  $|z|$ :  $|p(z)| \geq \frac{|c_N|}{2} |z|^N$ .  
Тем самым,  $p(z) \xrightarrow{|z| \rightarrow \infty} \infty$ , то есть  $f(z) \xrightarrow{|z| \rightarrow \infty} 0$ . А при малых  $|z|$ :  $f$  ограничена, как непрерывная функция на компакте.
- Тем самым, по теореме Лиувилля,  $f \equiv \text{const}$ , то есть  $p \equiv \text{const}$ . Противоречие, мы предполагали  $\deg p > 0$ .  $\square$

**Теорема 1.3.8** (Теорема о среднем). Пусть  $z_0 \in G$ ,  $f : G \rightarrow \mathbb{C}$  голоморфна в  $G$ . Выберем  $r < \text{dist}(z_0, \partial G)$ . Тогда

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(z_0 + re^{it}) dt$$

*Доказательство.* Посчитаем  $f(z_0)$  по интегральной формуле:

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta - z_0| = r} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z_0} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{f(z_0 + re^{it}) ire^{it}}{re^{it}} dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(z_0 + re^{it}) dt$$

$\square$

Это действительно среднее в обычном смысле:  $f$  проинтегрирована по окружности по мере Лебега, и интеграл поделили на меру окружности.

**Теорема 1.3.9** (Принцип максимума модуля). Пусть  $f : G \rightarrow \mathbb{C}$  — непостоянная голоморфная функция. Тогда  $|f| : z \mapsto |f(z)|$  не может достигать наибольшего значения при  $z \in G$ .

*Доказательство.* Пойдём от противного: пусть  $\exists z_0 \in G : \forall z \in G : |f(z)| \leq |f(z_0)|$ . Выберем  $r > 0 : B(z_0, r) \subset G$ , и докажем, что  $|f|$  постоянна в  $B(z_0, r)$ . Пусть  $\rho < r$ , по теореме о среднем

$$|f(z_0)| = \frac{1}{2\pi} \left| \int_0^{2\pi} f(z_0 + \rho e^{it}) dt \right| \leq \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \underbrace{|f(z_0 + \rho e^{it})|}_{\leq |f(z_0)|} dt, \text{ причём равенство достигается только если}$$

$\forall t \in [0, 2\pi] : |f(z_0 + \rho e^{it})| = |f(z_0)|$  (если  $\exists t_0 \in (0, 2\pi) : |f(z_0 + \rho e^{it_0})| < |f(z_0)|$ ), то по непрерывности  $\exists \varepsilon > 0 : \forall t \in (t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon) : |f(z_0 + \rho e^{it})| < |f(z_0)| - \varepsilon$ , то есть на промежутке  $(t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon)$  интеграл строго меньше требуемого значения).

**Лемма 1.3.1.** Пусть  $f : G \rightarrow \mathbb{C}$  голоморфна, и  $\exists z_0 \in G : f'(z_0) \neq 0$ . Тогда  $\exists U \ni z_0 : f(z_0) \in \text{Int } f(U)$ .

*Доказательство леммы.*

Теорема об обратной функции.  $\square$

Тем самым,  $\forall z \in B(z_0, r) : f'(z) = 0$  (так как  $|f(z)|$  — максимум).

Далее применяем теорему единственности, доказанную во II семестре:  $f$  и константа, равная  $|f(z_0)|$  совпадают на множестве с предельной точкой, значит, они совпадают везде в  $G$ .  $\square$

**Следствие 1.3.4.** Пусть  $G$  — ограниченная область,  $f : \overline{G} \rightarrow \mathbb{C}$  голоморфна в  $G$ . Тогда  $\forall z \in G : |f(z)| \leq \max_{\zeta \in \partial G} |f(\zeta)|$ .

*Доказательство.*  $f$  достигает своё наибольшее значение на компакте  $\overline{G}$ , но согласно принципу максимума, это значение достигается не внутри  $G$ .  $\square$

## 1.4 Гармонические функции

Запишем теорему о среднем для  $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ :

$$f(z_0) = \int_1^2 2\pi(f(z_0) + re^{it}) dt$$

Пусть  $f = u + iv$ , где  $u, v$  — вещественные функции в  $G$ . Теорема о среднем говорит, что

$$u(z_0) = \int_1^2 2\pi(u(z_0) + re^{it}) dt \quad v(z_0) = \int_1^2 2\pi(v(z_0) + re^{it}) dt$$

Так как  $f$  аналитична, то в вещественном смысле  $u, v \in C^\infty(G)$ .

Запишем уравнения Коши — Римана:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}$$

Дифференцируя второй раз, получаем

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \end{cases}$$

Это так называемое *уравнение Лапласа*:  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$ .

Обобщим. Пусть  $G \subset \mathbb{R}^n$  — область, пусть  $f \in C^2(G)$ .

**Определение 1.4.1** ( $f$  — гармоническая функция в  $G$ ).  $\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \dots + \frac{\partial^2 u}{\partial x_n^2} = 0$ .

Оператор  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \dots + \frac{\partial^2}{\partial x_n^2}$  называется *оператором Лапласа*, и понятно, что гармонические функции — в точности такие  $u$ , что  $\Delta u = 0$ .

**Утверждение 1.4.1.** Если  $u \in C^2(G)$ , где область  $G \subset \mathbb{R}^2$ , то локально существует голоморфная  $f : u = \Re f$ . Иными словами,  $\forall z_0 \in G : \exists U \ni z_0, \exists$  аналитическая  $f : U \rightarrow \mathbb{C} : u = \Re f$ .

*Доказательство.* Пусть  $\phi := \frac{\partial u}{\partial x}, \psi := -\frac{\partial u}{\partial y}$ . Тогда  $\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0$ , то есть  $\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}$  везде в  $G$ .

Раз накрест-взятые частные производные совпадают, то дифференциальная форма  $\phi dx + \psi dy$  замкнута, значит, локально имеется первообразная. **Что-то я немного выпал, а что дальше?**  $\square$

**Теорема 1.4.1** (Морера). Пусть  $f : (G \subset \mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}$  непрерывна. Следующие условия эквивалентны.

1.  $f$  голоморфна в  $G$ .
2.  $f$  аналитична в  $G$ .
3. Дифференциальная форма  $f(z) dz$  замкнута.

*Доказательство.* (1)  $\iff$  (2) уже доказано: (теорема 1.0.1) и (следствие 1.3.1).

(1)  $\Rightarrow$  (3) доказано тоже: (теорема 1.3.1).

Докажем (3)  $\Rightarrow$  (2). Пусть  $F$  — первообразная формы  $f(z) dz$  в круге  $B(z_0, r) \subset G$ .  $F$  голоморфна в  $B(z_0, r)$ , и  $\forall z \in D : F'(z) = f(z)$ .

Значит,  $F$  раскладывается в степенной ряд  $F(z) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j(z-z_0)^j$ . Отсюда  $f(z) = \sum_{j=1}^{\infty} j a_j(z-z_0)^{j-1}$ .  $\square$

## 1.5 Первообразная от замкнутой формы вдоль пути

### 1.5.1 Наводящие предположения

Пусть  $f dx + g dy$  — непрерывная дифференциальная форма в  $G$ , предположим, что она точная: имеется первообразная  $F$ .

Пусть  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$  — кусочно-гладкий путь. Ранее было получено, что  $\int_{\gamma} f dx + g dy = F(\gamma(b)) - F(\gamma(a))$ .

Давайте обобщим интеграл вдоль пути: пусть  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$  — произвольный непрерывный путь. Положим по определению  $\int_{\gamma} f dx + g dy \stackrel{\text{def}}{=} F(\gamma(b)) - F(\gamma(a))$ .

Теперь пусть  $f dx + g dy$  всего лишь замкнута. Выберем  $a = t_0 < t_1 < \dots < t_k = b$  так, что  $\forall j : \gamma([t_j, t_{j+1}])$  лежит в области  $G_j$ , в которой у формы  $f dx + g dy$  есть первообразная  $F_j$ . Попробуем определить

$$\int_{\gamma|_{[t_j, t_{j+1}]}} f dx + g dy \stackrel{\text{def}}{=} F_j(\gamma(t_{j+1})) - F_j(\gamma(t_j))$$

и

$$\int_{\gamma} f dx + g dy \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{j=0}^{k-1} F_j(\gamma(t_{j+1})) - F_j(\gamma(t_j))$$

Проблема в том, чтобы доказать, что определение корректно — не зависит от выбора разбиения  $a = t_0 < \dots < t_k = b$ .

### 1.5.2 Требуемые свойства

Пусть  $\Phi = f dx + g dy$  — замкнутая форма в области  $G \subset \mathbb{C}$ , и  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$  — путь.

**Определение 1.5.1** (Первообразная формы  $\Phi$  вдоль пути  $\gamma$ ). Функция  $v : [a, b] \rightarrow G$  со следующими свойствами:

1.  $\forall t \in [a, b] : \exists U \ni \gamma(t), \varepsilon > 0$  и найдётся первообразная  $F$  для  $\Phi$  на  $U$ , такая, что

$$\forall \tau \in (t - \varepsilon, t + \varepsilon) : v(\tau) = F(\gamma(\tau))$$

**Факт 1.5.1.** Функция  $v$ , если существует, непрерывна на  $[a, b]$ .

*Доказательство.* Непрерывность в какой-то конкретной точке следует из непрерывности композиции  $F \circ \gamma$ .  $\square$

**Теорема 1.5.1.** Первообразная замкнутой дифференциальной формы вдоль пути  $\gamma$  всегда существует, и любые две отличаются на константу.

*Доказательство.* Сначала докажем существование. Для всех  $t \in [a, b]$  выберем окрестность  $U_t := B(\gamma(t), r_t)$ , где  $r_t$  настолько мал, что в  $U_t$  есть первообразная.

Семейство  $\{U_t\}_{t \in [a, b]}$  образуют открытое покрытие  $\gamma([a, b])$ . По лемме Лебега  $\exists \varepsilon > 0 : \forall t \in [a, b] : B(\gamma(t), \varepsilon)$  содержится в каком-то  $U_{t'}$ . Применяя теорему Кантора о равностепенной непрерывности, получаем существование разбиения  $a = t_0 < \dots < t_k = b$ , такое, что  $\gamma([t_j, t_{j+1}])$  лежит в одном из  $U_t$ .

Произвольно выберем  $v(a)$ . Построим  $v|_{[t_j, t_{j+1}]}$  индукцией по  $j$ .

**База:** Пусть  $\gamma([t_0, t_1]) \subset U_0$ , и имеется первообразная  $F_0$  на  $U_0$ . Определим  $v(\tau) = F_0(\gamma(\tau))$  при  $\tau \in [t_0, t_1]$ .

Переход: Пусть  $\gamma([t_j, t_{j+1}]) \subset U_j, F_j$  — первообразная  $\Phi$  на  $U_j$ . Найдётся такое  $\delta > 0$  :  $\gamma([t_j - \delta, t_{j+1}]) \subset U_j$ , значит,  $U_j \cap U_{j-1} \neq \emptyset$ . Это пересечение связно, на нём имеются две первообразные,  $F_{j-1}$  и  $F_j$ .

Добавим константу к  $F_j$  так, чтобы  $F_j \equiv F_{j-1}$  при  $t \in [t_j - \delta, t_j]$ , и определим  $v(\tau) = F_j(\gamma(\tau))$  при  $\tau \in [t_j, t_{j+1}]$ . Окрестность  $U_j$  захватывает отрезок  $[t_j - \delta, t_{j+1}]$ , значит, для точек во внутренности выполнено условие из определения первообразной.

Докажем единственность: рассмотрим точку  $t \in [a, b]$ . Найдутся два круга  $U, V \ni \gamma(t)$ , и первообразные  $F, H$  формы  $\Phi$  в этих окрестностях, такие, что  $u(\tau) = F(\gamma(\tau))$  и  $v(\tau) = H(\gamma(\tau))$  при  $\tau$ , достаточно близких к  $t$ .

Тем самым,  $u - v$  локально постоянна, но локально постоянная функция на связном множестве — константа (прообраз любого элемента из образа открыто-замкнут).  $\square$