

Математические методы в биологии

Блок 3. Математическая статистика

Лекция 5

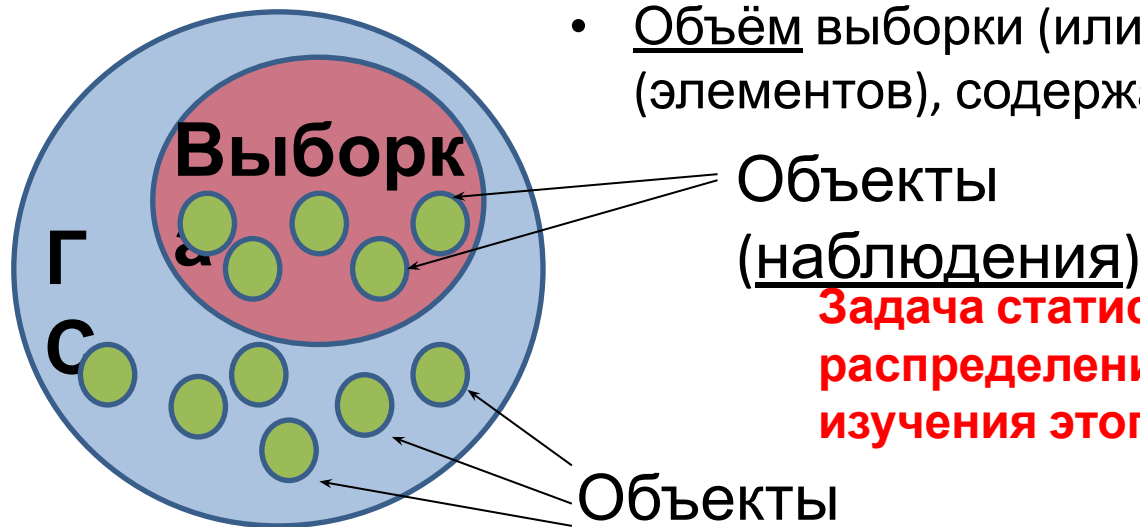
Козлова Ольга Сергеевна
89276755130, olga-sphinx@yandex.ru

Основные определения

- **Генеральная совокупность** – всё то множество объектов, относительно которого исследователь хотел бы делать выводы в рамках определённого исследования

Примеры ГС: все совершеннолетние жители Казани; все люди с заболеванием Альцгеймера

- **Выборка** – некая часть ГС, её модель, на основе изучения которой исследователь делает выводы о всей ГС.
- **Репрезентативность** выборки – её способность отражать существенные для исследования характеристики ГС
 - У объектов изучаются признаки (колич. либо кач.)
 - Объём выборки (или ГС) – количество объектов (элементов), содержащихся в выборке (или ГС)



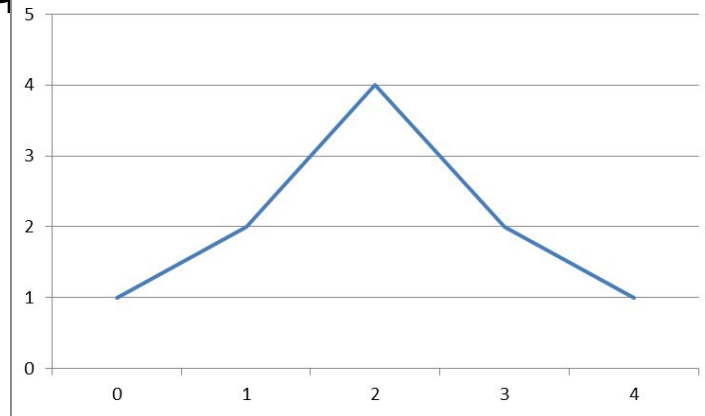
Задача статистики – делать выводы о распределении признака в ГС на основе изучения этого распределения в выборке!!!

Визуализация выборок

- Полигон – график, сопоставляющий варианты значений признака с их частотами (абсолютными или относительными) (для дискретных признаков)

Пример. Изучаем количество детей в семьях Москвы.

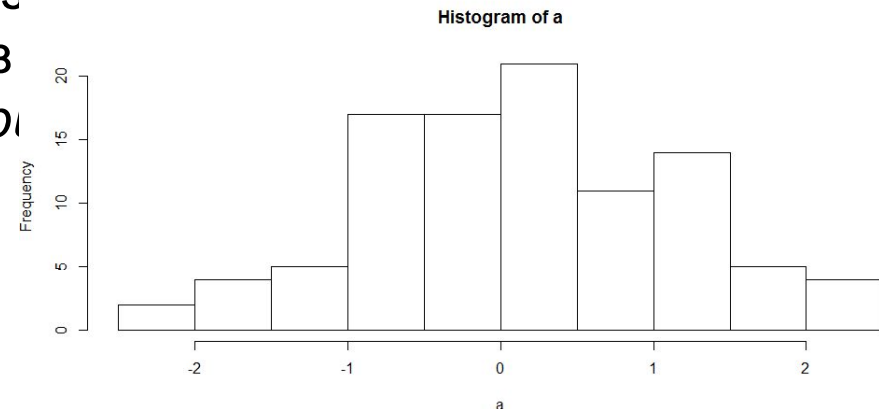
Кол-во семей	Кол-во детей
1	4
2	3
4	2
2	1
1	0



Объём выборки – 10
 x – кол-во детей в семье;
 y – кол-во семей с таким кол-вом детей
 Значения по y абсолютные.

- Гистограмма – ступенчатая фигура из прямоугольников с основанием, равным ширине интервала по оси x (значение признака), и высотой, равной частоте значений признака из

пример! Гистограмма абсолютных частот нормально распределённого признака с параметрами $\mu=0$ и $\sigma=1$ (объём выборки 100)



Описательные статистики

- Их цель – описать, охарактеризовать выборку x безотносительно ГС

Меры центральной тенденции
и изменчивости

Мода

Медиана

Выборочная средняя \bar{x}

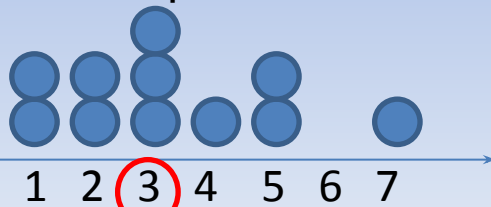
Меры

Размах

Выборочная дисперсия D_x

Стандартное отклонение $sd = \sqrt{D_x}$

Мода – самое часто встречаемое значение признака в выборке



Мода – единственная описат. статистика для качест. признака;
Мод м.б. несколько и 0

Медиана – то значение признака, которое делит упорядоченную выборку пополам:

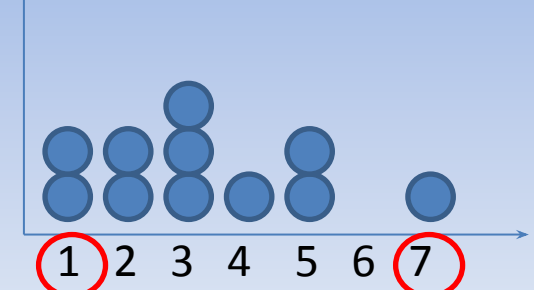
если число эл-тов

нечётно: 1 1 2 2 3 3 4 5 5 7

чётно: 1 1 2 2 3 3 4 5 5 7 8

$(3+3)/2=3$ (ср арифм.е)

Размах – расстояние между x_{min} и x_{max}



$7-1=6$

Выборочная средняя и выборочная дисперсия

- Выборочная средняя - среднее арифметическое всех значений признака в выборке:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- Выборочная средняя – случайная величина (изменяется от выборки к выборке для одной и той же ГС)
- Мат.ожидание выборочной средней как случайной величины есть **истинная средняя** – средняя для всей ГС: $M(\bar{x}) = \mu$ (т.е. \bar{x} - **несмещённая** оценка μ)
- Сумма отклонений значений признака от выборочной средней равна 0:

$$\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} = 0$$

- Выборочная дисперсия – сумма квадратов отклонений значений признака от выборочной средней, делённая на $n-1$ (n – объём выборки):

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

- Выборочную дисперсию можно вычислять так:

$$D_x = \overline{x^2} - \bar{x}^2$$

(Все правила для $M(X)$ и $D(X)$ (лекции №№3,4) переводятся на язык выборок)

И всё же, откуда в формуле выборочной дисперсии (n-1)?

Рассмотрим «очевидное» выражение для выборочной дисперсии:

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

Это случ. величина, зависящая от выборки дважды (так как включает в себя случайную величину \bar{x} , а не неизвестную константу μ).

Сумма квадратов отклонений значений признака от \bar{x} меньше, чем сумма квадратов отклонений значений признака от любого другого числа (в т.ч. от постоянной μ),

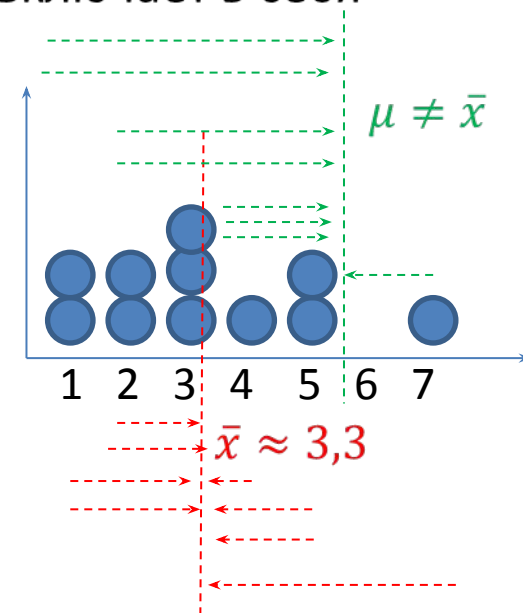
поэтому $D_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$ - это всегда **заниженная, смещённая оценка** генеральной (истинной) дисперсии.

Чтобы «приподнять» её, используют поправочный

коэффициент $\frac{n}{n-1}$ (стремится к 1 при $n \rightarrow \infty$)

$$\text{Отсюда } D_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

Использование поправочного коэффициента имеет обязательный характер при $n < 30$ и практически не влияет на значение дисперсии и станд.отклонения при $n \geq 100$.



Стандартная ошибка среднего (SE)

- Выборочная средняя \bar{x} - случайная величина с мат.ожиданием, равным μ
- ВОПРОС: чему равна дисперсия \bar{x} ? Пусть из ГС извлечено много выборок одинакового объёма n . Тогда

$$D(\bar{x}) = D\left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}\right) = \frac{1}{n^2} D(x_1 + x_2 + \dots + x_n)$$

$$= \frac{1}{n^2} (D(x_1) + \dots + D(x_n)) = \frac{1}{n^2} * n * D(x) = \frac{D(x)}{n}$$

Истинная дисперсия

Все наблюдения – из одной ГС, значит, и изменчивость одинакова

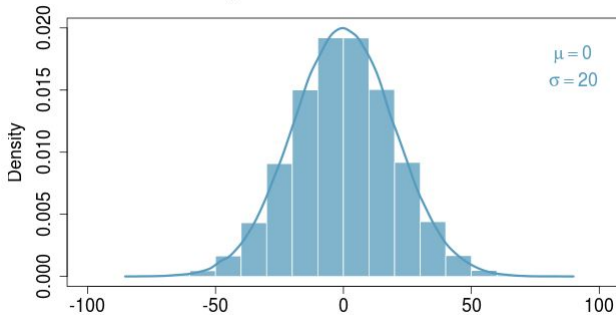
Используем выб. дисперсию D_x как оценку $D(x)$:

Работает для $n \geq 30!$

$$D(\bar{x}) = \frac{D_x}{n} \Rightarrow sd(\bar{x}) = \frac{sd(x)}{\sqrt{n}}$$

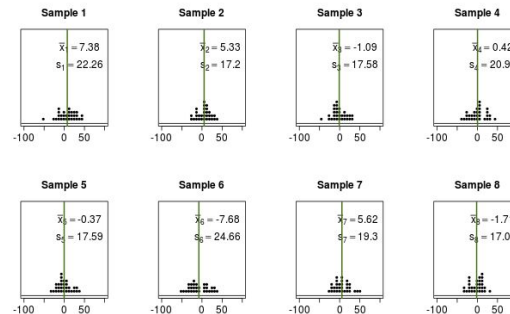
Формула стандартной ошибки

Population distribution: Normal

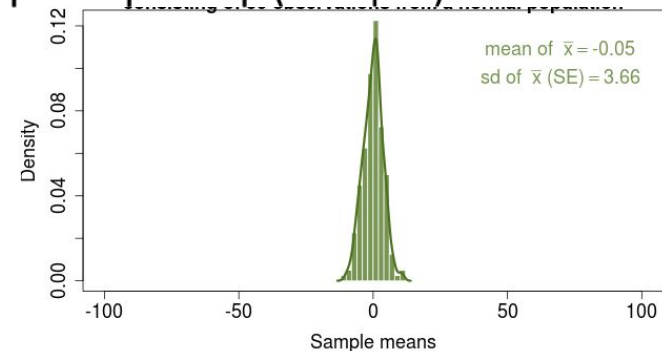


Генеральная совокупность

Т.к. \bar{x} - это, по сути, сумма взаимно независ. сл. вел, то распределение \bar{x} имеет норм. характер (по ЦПТ)



Выборки объёма



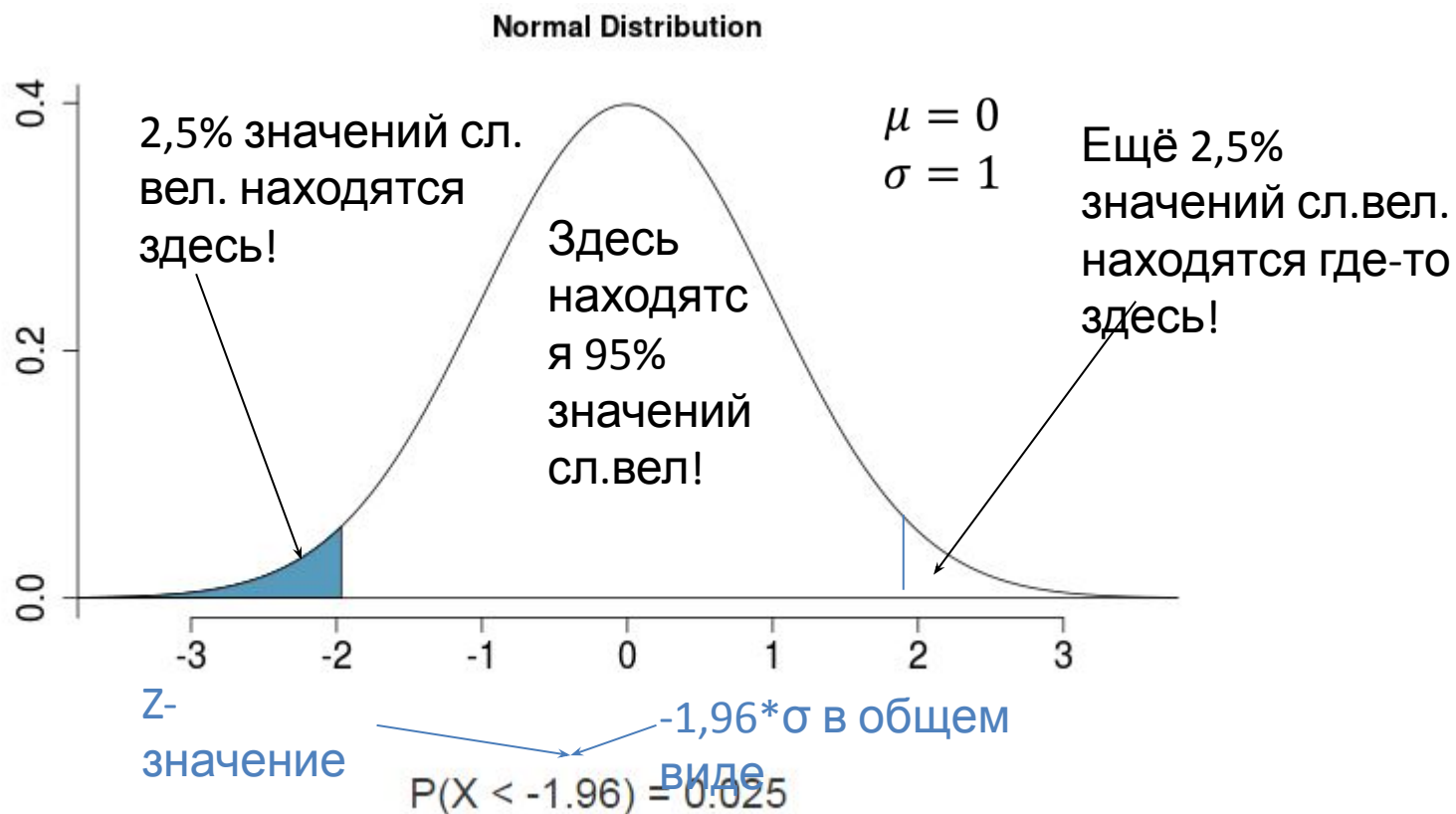
Распределение выб.

Построение доверительного интервала для среднего

- Пусть у нас есть выборка, и мы знаем \bar{x} и sd

ВОПРОС: Можем ли мы найти μ (истинное среднее)?

ОТВЕТ: И да, и нет!! Точное значение μ мы не узнаем, но можем указать численный интервал, в котором μ находится с определённой вероятностью (этот интервал называется **доверительным**).



Дов. инт-л – симметричный относительно мат.ожидания интервал, насчёт которого мы можем на сколько-то уверенно сказать, что там находится

Построение доверительного интервала для среднего.

Пример

Пусть есть некая выборка из 64 наблюдений с выборочным средним, равным 100, и стандартным отклонением, равным 4. Построить 95%-ный доверительный интервал для истинного среднего.

Решение. $n=64$, $\bar{x}=100$, $sd=4$.

Рассчитаем стандартную ошибку среднего: $SE = sd(\bar{x}) = \frac{sd}{\sqrt{n}} = \frac{4}{\sqrt{64}} = \frac{4}{8} = 0,5$

Истинное среднее имеет нормальное распределение с $\mu = \bar{x} = 100$ и $\sigma=0,5$.

95% значений истинного среднего расположены в интервале

от $\bar{x} - 1.96 * 0,5$ до $\bar{x} + 1.96 * 0,5$, значит, мы можем на 95% быть уверенны в том, что мат.ожидание (истинное среднее) находится где-то на отрезке $[99,02;100,98]$.

А как же другие интервалы?

%	Z-значение (то, на что умножать SE)
90	1,645
95	1,96
99	2,575

Гипотезы и их проверка

Понятие статистической гипотезы

Статистическая гипотеза - некое предположение о виде неизвестного распределения или о его параметрах.

Примеры статистических гипотез:

- 1) *Распределение роста студентов нормально*
- 2) *Средняя продолжительность жизни в России – 67 лет*

Нулевая гипотеза (H_0) – основное предположение, выдвинутое в статистическом исследовании (обычно пессимистична).

Альтернативная гипотеза (H_1) – гипотеза, противоречащая нулевой.

Гипотезы проверяются статистическими тестами.

Результат статистического теста – отклонение (😊) или не отклонение нулевой гипотезы (😞)

Отклонение нулевой гипотезы означает принятие альтернативной (😊)

НО: Не отклонение нулевой гипотезы – это ещё не отклонение альтернативной!

Типовой пример статистической задачи на проверку гипотез

Средний срок выздоровления от некоторого заболевания – 20 дней. Для борьбы с заболеванием было разработано новое лекарство. Данные по его применению: $n=64$, $\bar{x} = 18,5$, $sd = 4$.

ВОПРОС: Действительно ли новое лекарство влияет на срок выздоровления или эти различия случайны (попалась «везучая» выборка)?

ПОСТАНОВКА ГИПОТЕЗ:

$H_0: \mu = 20$ (мат.ожидание случайной величины «средний срок выздоровления после приёма нового лекарства» не отличается от 20, т.е. наблюдаемые различия носят случайный характер)

$H_1: \mu \neq 20$ (различия не случайны, лекарство влияет на срок выздоровления)

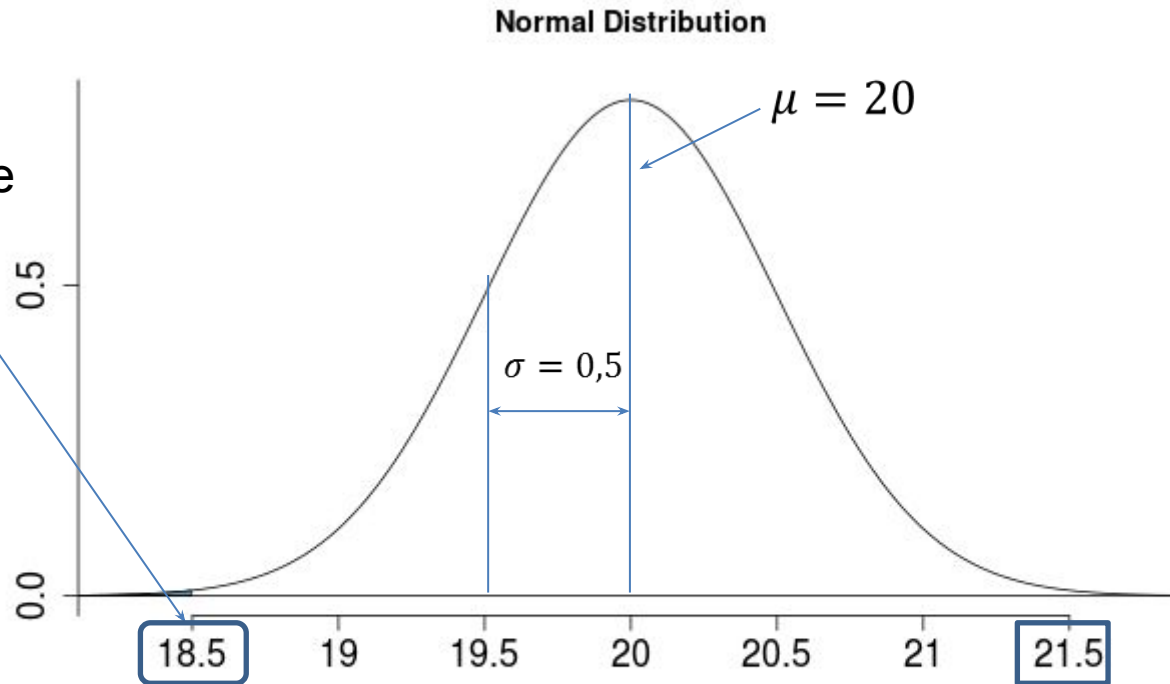
ДОПУСТИМ, ВЕРНА НУЛЕВАЯ ГИПОТЕЗА (в среднем, выборка из 64 человек выздоравливает за 20 дней даже после нового лекарства)

Рассчитаем стандартную ошибку среднего: $SE = \frac{4}{\sqrt{64}} = 0,5$

При условии соблюдения H_0 случайная величина «средний срок выздоровления после приёма нового лекарства» имеет нормальное распределение с мат.ожиданием 20 и стандартным отклонением 0,5.

Распределение сл.вел. «средний срок выздоровления после приёма нового лекарства» при условии принятия H_0

А вот где наше выборочное среднее!!



$$P(X < 18.5) = 0.00135$$

Если мы принимаем H_0 , то наше выборочное среднее отклоняется от 20 аж на 3 стандартных отклонения! Вероятность наблюдать такие и более серьёзные отклонения составляет $0,00135 * 2 = 0,0027$ (p-value, или уровень значимости).

P-value (уровень значимости)

- Это вероятность наблюдения заданных отклонений (различий) при условии, что верна H_0 (вероятность случайности заданного выборочного значения)
- Чем меньше, тем большее право имеем на отклонение H_0
- «Золотой стандарт» порогового уровня p-value – 0,05 (<0,05 – отклоняем H_0 и принимаем H_1 , если $\geq 0,05$ – оснований для отклонения H_0 недостаточно!)
- Обычно двусторонний (вычисляем вероятность отклонения как в одну, так и в другую сторону)

Статистические ошибки

- Ошибка первого рода – отклонили H_0 , хотя она была верна (выборочные данные были получены случайно)

Последствия – получили ложно статистически значимый вывод.

Возможный способ борьбы – уменьшить пороговое p-value (до 0,001, например). **P-value – вероятность совершить ошибку первого рода.**

- Ошибка второго рода – не отклонили H_0 , хотя она не была верна (верна H_1).

Последствия – не получили статистического вывода.

Возможный способ борьбы – увеличить объём выборки.

Чем чреватые маленькие выборки ($n < 30$)

- Выборочные средние сильнее отклоняются от $\mu \Rightarrow$ нарушаются условия ЦПТ, т.е. нормальность распределения \bar{x}
- Выборочные стандартные отклонения хуже описывают истинные \Rightarrow не имеем права заменить истинное ст.отклонение на выборочное в формуле для вычисления стандартной ошибки среднего

Что же делать?

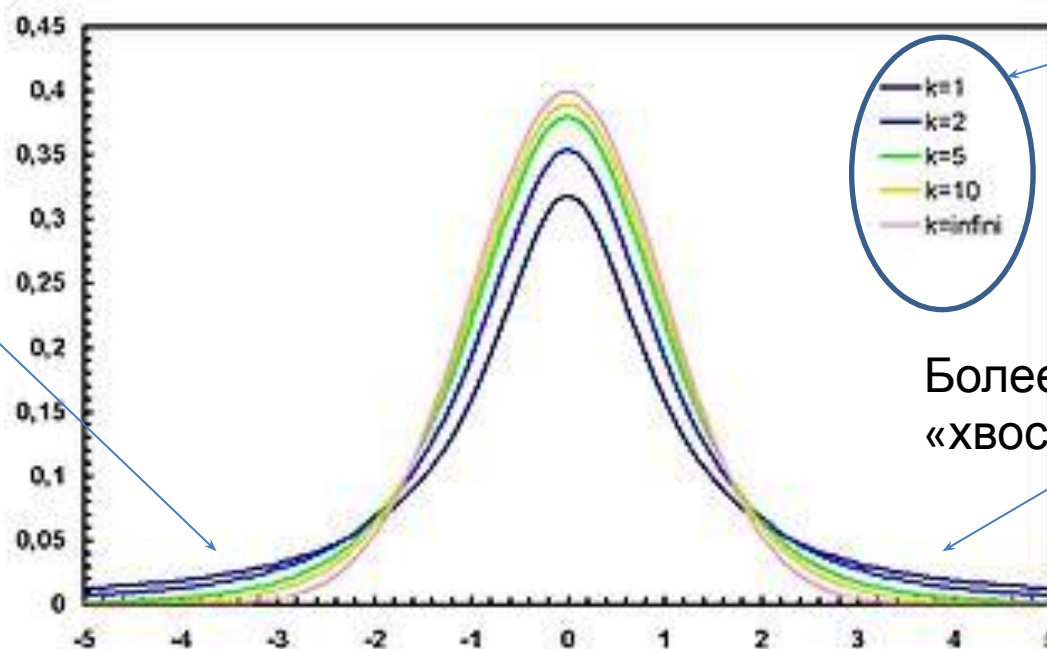
Заменить нормальное распределение для \bar{x} распределением Стьюдента (t-рас-е)

Увеличивается
вер-ть
попадания с.в. в
крайние
интервалы
($\pm 2\sigma$)
 $N(0,1)$

$$T = \frac{Z}{\sqrt{V/k}}$$

$\chi^2(k)$

Бледно-фиолетовая линия – обыкновенное нормальное



Пар-р k (число
степеней
свободы)
 $k = n - 1$ (n-объём
выборки)

Более высокие
«хвосты»

Нормальное распределение vs распределение Стьюдента

- Вероятностные характеристики N постоянны – для t они зависят от k ($k=n-1$, так как, зная выборочное среднее, последнее значение тоже известно)

Пример. Есть выборка с параметрами: $\bar{x} = 10,8$; $sd = 2$; $n = 25$

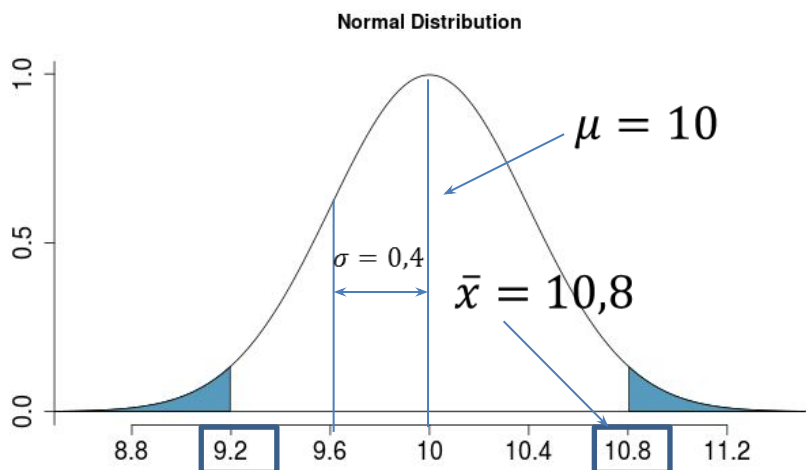
$$H_0: \mu = 10$$

По нормальному распределению:

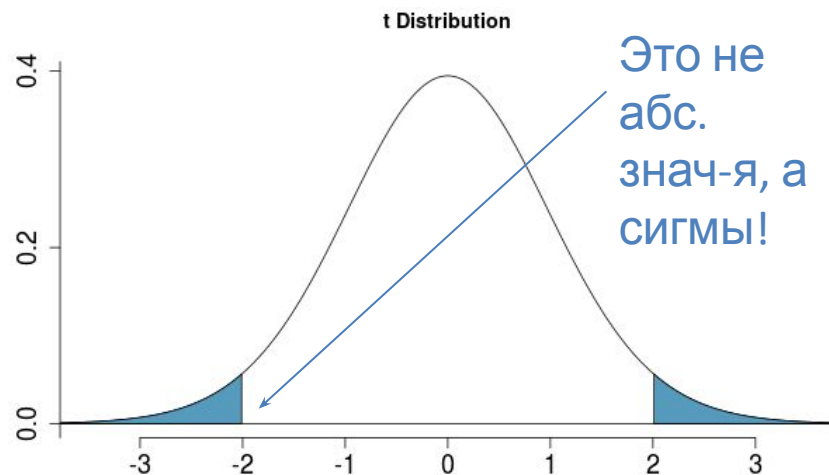
$$SE = \frac{2}{\sqrt{25}} = 0,4$$

По распределению Стьюдента:

$$k \text{ (число степ.свободы)} = 25 - 1 = 24$$



$$P(X < 9.2 \text{ or } X > 10.8) = 0.0455$$



$$P(X < -2 \text{ or } X > 2) = 0.0569$$

Вер-ть наблюдать случайное отклонение на

$p\text{-value} = 0,0455 < 0,05 \Rightarrow H_0$

$p\text{-value} = 0,0569 > 0,05 \Rightarrow H_0 \text{ не}$

Сравнение средних – парный t-тест

Постановка задачи.

Есть две выборки:

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= x_1 \\ sd &= sd_1 \\ n &= n_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{x}_2 &= x_2 \\ sd &= sd_2 \\ n &= n_2\end{aligned}$$

Выборки принадлежат одной

ГС

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Выборки принадлежат разным
ГС

\bar{x}_1 и \bar{x}_2 - случайные величины $\Rightarrow \bar{x}_1 - \bar{x}_2$ - тоже случайная величина.

ЕСЛИ ВЕРНА НУЛЕВАЯ ГИПОТЕЗА, то она распределена с $\mu(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = 0$ и

$sd(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \sqrt{\frac{sd_1^2}{n_1} + \frac{sd_2^2}{n_2}}$ (квадратный корень суммы квадратов стандартных ошибок средних) (т.к. $D(X - Y) = D(X) + D(Y)$, см. пред. презентацию)

Это t-распределение с числом степеней свободы $k = n_1 - 1 + n_2 - 1 = n_1 + n_2 - 2$

$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{sd_1^2}{n_1} + \frac{sd_2^2}{n_2}}}$ - величина, показывающая, сколько станд. отклонений

укладывается в отклонение между с.в. $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$ и конст. $\mu_1 - \mu_2$

p-value

Пример на сравнение средних

Процесс денатурации ДНК (разрушения водородных связей между её цепями) зависит от температуры, которая может различаться у разных видов.

В исследовании сравнивали температуру денатурации ДНК у двух биологических видов.

		sd	n
Вид №1	89,9	11,3	20
Вид №2	80,7	11,7	20

ВОПРОС: Правда ли, что у вида 1 и вида 2 разная температура денатурации (являются ли различия статистически значимыми)?

ФОРМУЛИРОВКА ГИПОТЕЗ:

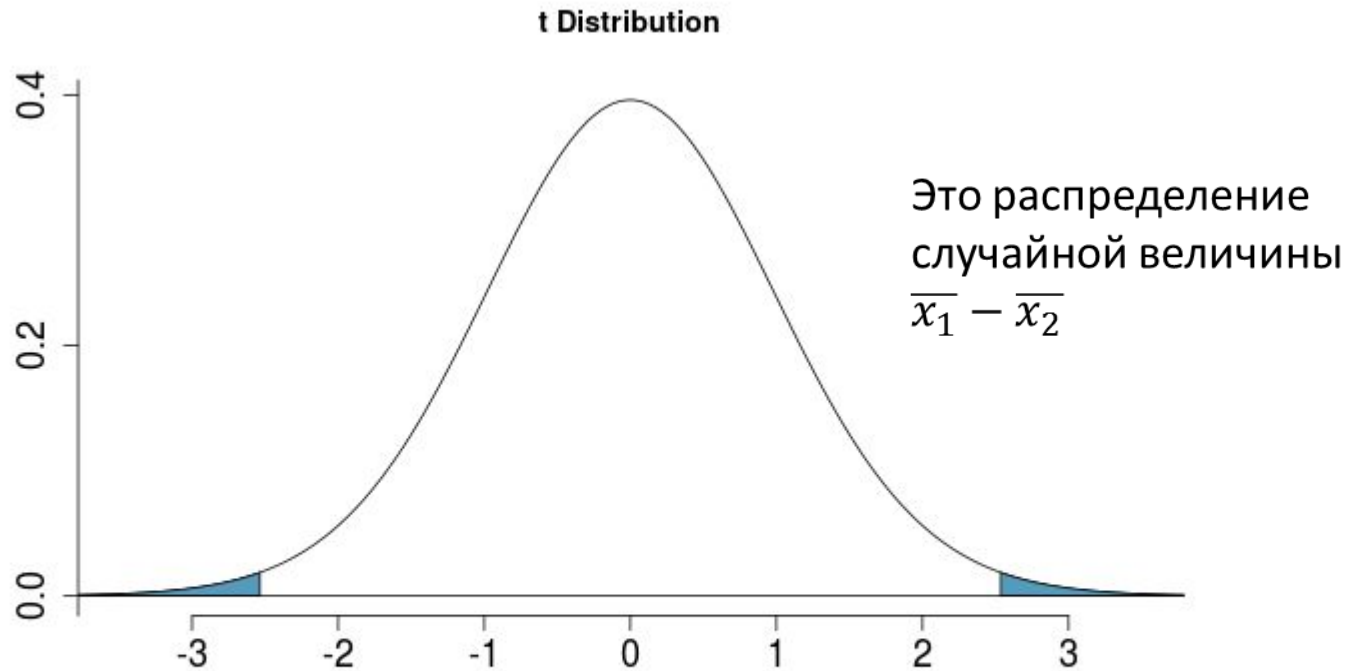
$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Рассчитаем t-значение:
$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{sd_1^2}{n_1} + \frac{sd_2^2}{n_2}}} = \frac{89,9 - 80,7}{\sqrt{\frac{11,3^2}{20} + \frac{11,7^2}{20}}} = \frac{9,2}{\sqrt{\frac{127,69 + 136,89}{20}}} \approx 2,53$$

(разность между выб.средними отклонилась от разности между мат.ожиданиями на 2,53 стандартных отклонений)

t-распределение с 38 степенями свободы (38=20+20-2)



$$P(X < -2.53 \text{ or } X > 2.53) = 0.0157$$

При условии, что верна нулевая гипотеза, вероятность наблюдать отклонение разности выборочных средних от 0 в более чем 2,53 стандартных отклонения равна 0,0157 ($<0,05$) \Rightarrow отклоняем нулевую гипотезу (разница между температурами денатурации статистически значима).

Резюме (или что мы умеем делать из статистики)

1. Строить доверительный интервал для среднего с исп-ем ЦПТ (например, $(\bar{x} - 1.96 * SE; \bar{x} + 1.96 * SE)$ для 95%-ного интервала)
2. Проверять гипотезу о соответствии мат.ожидания выборочного среднего числу с исп-ем свойств норм.распр-я и t-распр-я
3. Проводить t-тест и сравнивать средние двух выборок

