

# Заметки к семинарам по метрике

[https://github.com/bdemeshev/metrics\\_pro](https://github.com/bdemeshev/metrics_pro)

20 сентября 2024 г.

## Содержание

1	МНК — это...	3
2	Дифференциал — просто няшка!	6
3	МНК в матрицах и геометрия!	7
4	Проекция и законы распределения	9
5	МНК со статистическими предпосылками	10
6	Гамма и бета распределения	11
7	Блочные матрицы	12
8	Приятно-следственные связи, CUPED	13
9	Максимально правдоподобно	14
10	Гетероскедастичность	17
11	Логит, пробит и хоббит!	19
12	Эндогенность	21
13	Системы уравнений	23
14	GMM	24
15	Панельки	26
16	Решения	27
17	Источники мудрости	43

## 1 МНК — это...

Истинная модель. Например,  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 z_i + u_i$ .

Формула для прогнозов. Например,  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i + \hat{\beta}_3 z_i$ .

Метод наименьших квадратов,  $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min$ .

- 1.1** Каждый день Маша ест конфеты и решает задачи по эконометрике. Пусть  $x_i$  — количество решённых задач, а  $y_i$  — количество съеденных конфет.

$x_i$	$y_i$
1	1
2	2
2	4

Рассмотрим модель  $y_i = \beta x_i + u_i$ .

- Найдите МНК-оценку  $\hat{\beta}$  для имеющихся трёх наблюдений.
- Нарисуйте исходные точки и полученную прямую регрессии.
- Выведите формулу для  $\hat{\beta}$  в общем виде для  $n$  наблюдений.

Рассмотрим модель  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + u_i$ .

- Найдите МНК-оценки  $\hat{\beta}_1$  и  $\hat{\beta}_2$  для имеющихся трёх наблюдений.
- Нарисуйте исходные точки и полученную прямую регрессии.
- Выведите формулу для  $\hat{\beta}_2$  в общем виде для  $n$  наблюдений.

- 1.2** Докажите формулы или приведите контр-пример:

- $\sum_i (x_i - \bar{x})^2 = \sum_i (x_i - \bar{x})x_i$ ;
- $\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_i (x_i - \bar{x})y_i$ ;
- $\sum_{ij} (x_i - x_j)^2 = 2n \sum_i (x_i - \bar{x})^2$ ;
- $\sum_{ij} (x_i - x_j)(y_i - y_j) = 2 \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ ;
- $\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_i x_i y_i$ ;

- 1.3** Упростите выражения:

- $n\bar{x} - \sum x_i$ ;
- $\sum (x_i - \bar{x})\bar{x}$ ;
- $\sum (x_i - \bar{x})\bar{z}$ ;
- $\sum (x_i - \bar{x})^2 + n\bar{x}^2$ .

- 1.4** При помощи метода наименьших квадратов найдите оценку неизвестного параметра  $\theta$  в следующих моделях:

- $y_i = \theta + \theta x_i + \varepsilon_i$ ;
- $y_i = 1 + \theta x_i + \varepsilon_i$ ;
- $y_i = \theta/x_i + \varepsilon_i$ ;
- $y_i = \theta x_i + (1 - \theta)z_i + \varepsilon_i$ .

- 1.5** Найдите МНК-оценки параметров  $\alpha$  и  $\beta$  в модели  $y_i = \alpha + \beta y_i + \varepsilon_i$ .

- 1.6** Рассмотрите модели  $y_i = \alpha + \beta(y_i + z_i) + \varepsilon_i$ ,  $z_i = \gamma + \delta(y_i + z_i) + \varepsilon_i$ .

- Как связаны между собой  $\hat{\alpha}$  и  $\hat{\gamma}$ ?

б) Как связаны между собой  $\hat{\beta}$  и  $\hat{\delta}$ ?

**1.7** Как связаны МНК-оценки параметров  $\alpha, \beta$  и  $\gamma, \delta$  в моделях  $y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i$  и  $z_i = \gamma + \delta x_i + v_i$ , если  $z_i = 2y_i$ ?

**1.8** Для модели  $y_i = \beta_1 x_i + \beta_2 z_i + \varepsilon_i$  решите условную задачу о наименьших квадратах:

$$Q(\beta_1, \beta_2) := \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_1 x_i - \hat{\beta}_2 z_i)^2 \rightarrow \min_{\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 = 1}.$$

**1.9** Перед нами два золотых слитка и весы, производящие взвешивания с ошибками. Взвесив первый слиток, мы получили результат 300 грамм, взвесив второй слиток — 200 грамм, взвесив оба слитка — 400 грамм. Оцените вес каждого слитка методом наименьших квадратов.

**1.10** Аня и Настя утверждают, что лектор опоздал на 10 минут. Таня считает, что лектор опоздал на 3 минуты. С помощью МНК оцените, на сколько опоздал лектор.

**1.11** Есть двести наблюдений. Вовочка оценил модель  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i$  по первой сотне наблюдений. Петечка оценил модель  $\hat{y}_i = \hat{\gamma}_1 + \hat{\gamma}_2 x_i$  по второй сотне наблюдений. Машенька оценила модель  $\hat{y}_i = \hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_2 x_i$  по всем наблюдениям.

- а) Возможно ли, что  $\hat{\beta}_2 > 0, \hat{\gamma}_2 > 0$ , но  $\hat{\phi}_2 < 0$ ?
- б) Возможно ли, что  $\hat{\beta}_1 > 0, \hat{\gamma}_1 > 0$ , но  $\hat{\phi}_1 < 0$ ?
- в) Возможно ли одновременное выполнение всех упомянутых условий?
- г) Возможно ли одновременное выполнение всех упомянутых условий, если в каждой сотне наблюдений  $\sum x_i > 0$ ?

**1.12** Эконометрист Вовочка собрал интересный набор данных по студентам третьего курса:

- переменная  $y_i$  — количество пирожков, съеденных  $i$ -ым студентом за прошлый год;
- переменная  $f_i$ , которая равна 1, если  $i$ -ый человек в выборке — женщина, и 0, если мужчина.
- переменная<sup>1</sup>  $m_i$ , которая равна 1, если  $i$ -ый человек в выборке — мужчина, и 0, если женщина.

Вовочка оценил 4 регрессии:

- A:  $y$  на константу и  $f$ ,  $\hat{y}_i = \hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 f_i$ ;
- B:  $y$  на константу и  $m$ ,  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 m_i$ ;
- C:  $y$  на  $f$  и  $m$  без константы,  $\hat{y}_i = \hat{\gamma}_1 f_i + \hat{\gamma}_2 m_i$ ;
- D:  $y$  на константу,  $f$  и  $m$ ,  $\hat{y}_i = \hat{\delta}_1 + \hat{\delta}_2 f_i + \hat{\delta}_3 m_i$ ;

- а) Какой смысл будут иметь оцениваемые коэффициенты?
- б) Как связаны между собой оценки коэффициентов этих регрессий?

**1.13** Эконометрист Вовочка оценил методом наименьших квадратов модель 1,  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 z_i + \varepsilon_i$ , а затем модель 2,  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 z_i + \beta_4 w_i + \varepsilon_i$ . Сравните полученные  $ESS, RSS, TSS$  и  $R^2$ .

**1.14** Что происходит с  $TSS, RSS, ESS, R^2$  при добавлении нового наблюдения? Если величина может изменяться только в одну сторону, то докажите это. Если возможны и рост, и падение, то приведите пример.

**1.15** Эконометресса Аглая подглядела, что у эконометрессы Жозефины получился  $R^2$  равный 0.99 по 300 наблюдениям. От чёрной зависти Аглая не может ни есть, ни спать.

<sup>1</sup>Это нетолерантная задача и здесь либо  $f$  равно 1, либо  $m$

- а) Аглая добавила в набор данных Жозефины ещё 300 наблюдений с такими же регрессорами, но противоположными по знаку играками, чем были у Жозефины. Как изменится  $R^2$ ?
- б) Жозефина заметила, что Аглая добавила 300 наблюдений и вычеркнула их, вернув набор данных в исходное состояние. Хитрая Аглая решила тогда добавить всего одно наблюдение так, чтобы  $R^2$  упал до нуля. Удастся ли ей это сделать?

**1.16** На работе Феофан построил парную регрессию по трём наблюдениям и посчитал прогнозы  $\hat{y}_i$ . Придя домой он отчасти вспомнил результаты:

$y_i$	$\hat{y}_i$
0	1
6	?
6	?

Поднапрягшись, Феофан вспомнил, что третий прогноз был больше второго. Помогите Феофану восстановить пропущенные значения.

**1.17** Вся выборка поделена на две части. Возможны ли такие ситуации:

- а) Выборочная корреляция между  $y$  и  $x$  примерно равна нулю в каждой части, а по всей выборке примерно равна единице;
- б) Выборочная корреляция между  $y$  и  $x$  примерно равна единице в каждой части, а по всей выборке примерно равна нулю?

**1.18** Бесстрашный исследователь Ипполит оценил парную регрессию. При этом оказалось, каждый  $x_i > 0$  и обе оценки коэффициентов  $\hat{\beta}_1$  и  $\hat{\beta}_2$  также положительны.

- а) Возможно ли, что среди  $\hat{y}_i$  есть отрицательные? Среди  $y_i$  есть отрицательные?
- б) Возможно ли, что сумма  $\sum \hat{y}_i$  отрицательна? Сумма  $\sum y_i$  отрицательна?
- в) Как изменятся ответы, если известно, что  $\sum x_i > 0$ ?

**1.19** Предложите способ подсчёта корреляции

- а) между бинарной переменной и факторной переменной;
- б) между количественной переменной и факторной переменной.

**1.20** Начинающий художник Франческо нарисовал облако из 1000 точек в осях  $(x, y)$ . Разные наблюдения независимы, для каждой пары точек  $\text{Corr}(x_i, y_i) = 0.5$ . По отдельности величины  $x_i$  и  $y_i$  имеют стандартное нормальное распределение.

- а) Правда ли, что облако точек примерно симметрично относительно оси  $x = y$ ?
- б) Воспроизведите примерно шедевр начинающего мастера.
- в) Добавьте к облаку точек линии парных регрессий  $y$  от  $x$  и  $x$  от  $y$ .

**1.21** Подающий надежды молодой художник Франческо увлекся минимализмом. Он нарисовал три точки на плоскости  $(x, y)$  симметрично линии  $x = y$  так, что выборочные средние  $\bar{x} = \bar{y} = 0$ , выборочные дисперсии равны 1. А выборочная корреляция равна 0.5.

- а) Воспроизведите рисунок начинающего маэстро.
- б) Добавьте на рисунок линии парных регрессий  $y$  от  $x$  и  $x$  от  $y$ .

**1.22** Усердный муравей Виталий вместо того, чтобы построить одну регрессию по  $n$  точкам, построил все возможные парные регрессии для каждой пары точек  $(i, j)$ . При этом Виталий получил множество оценок коэффициентов  $\hat{\beta}_{1ij}$  и  $\hat{\beta}_{2ij}$ .

Сами наблюдения не сохранились, однако для каждой пары точек помимо двух оценок также сохранился квадрат расстояния между ними по горизонтали  $q_{ij} = (x_i - x_j)^2$ .

- а) Помогите Виталию восстановить классическую мнк-оценку  $\hat{\beta}_2$ .  
 б) Помогите Виталию восстановить классическую мнк-оценку  $\hat{\beta}_1$ .

## 2 Дифференциал — просто няшка!

Дифференциал для матриц подчиняется правилам:

- $d(A + B) = dA + dB$ ;
- Если  $A$  — матрица констант, то  $dA = 0$ ;
- $d(AB) = dA \cdot B + A \cdot dB$ . Если  $A$  — матрица констант, то  $d(AB) = AdB$ ;

Штрих у матрицы традиционно обозначает не производную, а транспонирование,  $A' = A^T$ .

### 2.1 Вспомним дифференциал :)

- а) Известно, что  $f(x) = x^2 + 3x$ . Найдите  $f'(x)$  и  $df$ . Чему равен  $df$  в точке  $x = 5$  при  $dx = 0.1$ ?  
 б) Известно, что  $f(x_1, x_2) = x_1^2 + 3x_1x_2^3$ . Найдите  $df$ . Чему равен  $df$  в точке  $x_1 = -2, x_2 = 1$  при  $dx_1 = 0.1$  и  $dx_2 = -0.1$ ?  
 в) Известно, что  $F = \begin{pmatrix} 5 & 6x_1 \\ x_1x_2 & x_1^2x_2 \end{pmatrix}$ . Найдите  $dF$ .  
 г) Известно, что  $F = \begin{pmatrix} 7 & 8 & 9 \\ 2 & -1 & -2 \end{pmatrix}$ . Найдите  $dF$ .  
 д) Матрица  $F$  имеет размер  $2 \times 2$ , в строке  $i$  столбце  $j$  у неё находится элемент  $f_{ij}$ . Выпишите выражение  $\text{trace}(F'dF)$  в явном виде без матриц.

### 2.2 Пусть $A, B$ — матрицы констант, $R$ — матрица переменных, $r$ — вектор столбец переменных. Применив базовые правила дифференцирования найдите:

- а)  $d(ARB)$ ;  
 б)  $d(r'r)$ ;  
 в)  $d(r'Ar)$ ;  
 г)  $d(R^{-1})$ , воспользовавшись тем, что  $R^{-1} \cdot R = I$ ;  
 д)  $d \cos(r'r)$ ;  
 е)  $d(r'Ar/r'r)$ .

Упростите ответ для случая симметричной матрицы  $A$ .

### 2.3 В методе наименьших квадратов минимизируется функция

$$Q(\hat{\beta}) = (y - X\hat{\beta})'(y - X\hat{\beta}).$$

- а) Найдите  $dQ(\hat{\beta})$  и  $d^2Q(\hat{\beta})$ ;  
 б) Выпишите условия первого порядка для задачи МНК;  
 в) Выразите  $\hat{\beta}$  предполагая, что  $X'X$  обратима.

### 2.4 В гребневой регрессии (ridge regression) минимизируется функция

$$Q(\hat{\beta}) = (y - X\hat{\beta})'(y - X\hat{\beta}) + \lambda \hat{\beta}'\hat{\beta},$$

где  $\lambda$  — положительный параметр, штрафующий функцию за слишком большие значения  $\hat{\beta}$ .

- а) Найдите  $dQ(\hat{\beta})$  и  $d^2Q(\hat{\beta})$ ;

- б) Выпишите условия первого порядка для задачи гребневой регрессии;  
 в) Выразите  $\hat{\beta}$ .

**2.5** Исследователь Никодим поймал 100 морских ежей и у каждого измерил длину,  $a_i$ , и вес  $b_i$ . Вектор измерений, относящихся к одному ежу обозначим  $y_i = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \end{pmatrix}$ . Никодим считает, что ежи независимы друг от друга, а длина и вес имеют совместное нормальное распределение

$$y_i = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \end{pmatrix} \sim \mathcal{N}(\mu, C)$$

- а) Выпишите логарифмическую функцию правдоподобия,  $\ell(\mu, C)$ ;  
 б) Предполагая ковариационную матрицу известной,  $C = \begin{pmatrix} 9 & 4 \\ 4 & 6 \end{pmatrix}$ , найдите  $d\ell$  и оценку  $\hat{\mu}$  методом максимального правдоподобия.  
 в) Предполагая, вектор ожиданий известным,  $\mu = \begin{pmatrix} 10 \\ 5 \end{pmatrix}$ , найдите  $d\ell$  и оценку  $\hat{C}$  методом максимального правдоподобия.  
 г) Найдите  $d\ell(\mu, C)$  и оценки для параметров  $\mu$  и  $C$ , в случае, когда  $\mu$  и  $C$  неизвестны.

### 3 МНК в матрицах и геометрия!

**3.1** Рассмотрим регрессию  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 z_i + \hat{\beta}_2 x_i$ . Все исходные данные поместим в матрицу  $X$  и вектор  $y$ :

$$X = \begin{pmatrix} z_1 & x_1 \\ \vdots & \vdots \\ z_n & x_n \end{pmatrix} \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

- а) Выпишите явно матрицы  $X'$ ,  $X'y$ ,  $X'X$ ,  $y'X$ ,  $y'y$  и укажите их размер.  
 б) Выпишите условия первого порядка для оценок  $\hat{\beta}_1$  и  $\hat{\beta}_2$  по методу наименьших квадратов.  
 в) Запишите эти же условия в виде линейной системы

$$\begin{cases} \hat{\beta}_1 \cdot \dots + \hat{\beta}_2 \cdot \dots = \dots \\ \hat{\beta}_1 \cdot \dots + \hat{\beta}_2 \cdot \dots = \dots \end{cases}$$

- г) Как упростится данная система для регрессии  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i$ ?  
 д) Запишите систему условий первого порядка с помощью матрицы  $X$  и вектора  $y$ ;

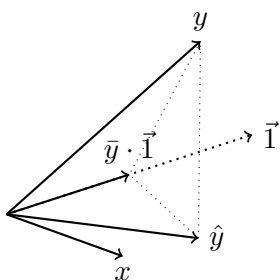
**3.2** Пусть  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 z_i + \varepsilon_i$  — регрессионная модель, где  $X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $y = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$ ,  $\beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}$ ,

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{pmatrix}, \text{ ошибки } \varepsilon_i \text{ независимы и нормально распределены с } \mathbb{E}(\varepsilon) = 0, \text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2 I.$$

Для удобства расчётов даны матрицы:  $X'X = \begin{pmatrix} 5 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$  и  $(X'X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1/3 & -1/3 & 0 \\ -1/3 & 4/3 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix}$

- а) Укажите число наблюдений.

- Найдите на картинке все перпендикулярные векторы. Найдите на картинке все прямоугольные треугольники. Сформулируйте для них теоремы Пифагора.



- 

- 8



- г)  $I - H$ ;
- д)  $A'(I - H)A$ ;
- е)  $A'A - G(G'A^{-1}(A')^{-1}G)^{-1}G'$

**3.10** У нас есть  $n$  наблюдений. Для каждого из данных случаев найдите матрицу-шляпницу  $H$ , проецирующую векторы на пространство столбцов матрицы регрессоров  $X$ , вектор  $\hat{y}$ ,  $RSS$ ,  $ESS$ ,  $TSS$ :

- а)  $\hat{y}_i = \hat{\beta}, n = 10$ ;
- б)  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i, n = 3, x_i = i, y_i = i^2$ ;
- в)  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i, n = 15, y_i = i$ , первые пять  $x_i$  равны 0, а остальные — 1;
- г)  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i, n = 15, y_i = i$ , первые пять  $x_i$  равны 1, а остальные — 0;

## 4 Проекция и законы распределения

**4.1** Рассмотрим пространство  $\mathbb{R}^3$  и два подпространства в нём,  $W = \{(x_1, x_2, x_3) \mid x_1 + 2x_2 + x_3 = 0\}$  и  $V = \text{Lin}((1, 2, 3)^T)$ .

- а) Найдите  $\dim V, \dim W, \dim V \cap W, \dim V^\perp, \dim W^\perp$ .
- б) Найдите проекцию произвольного вектора  $u$  на  $V, W, V \cap W, V^\perp, W^\perp$ . Найдите квадрат длины каждой проекции.
- в) Как распределён квадрат длины проекции в каждом случае, если дополнительно известно, что вектор  $u$  имеет многомерное стандартное нормальное распределение?

**4.2** Рассмотрим пространство  $\mathbb{R}^n$ , где  $n > 2$ , и два подпространства в нём,  $V = \text{Lin}((1, 1, \dots, 1)^T)$  и  $W = \{x \mid x_1 = x_2 + x_3 + \dots + x_n\}$ .

- а) Найдите  $\dim V, \dim W, \dim V \cap W, \dim V^\perp, \dim W^\perp, \dim V \cap W^\perp, \dim V^\perp \cap W$ .
- б) Найдите проекцию произвольного вектора  $u$  на каждое упомянутое подпространство. Найдите квадрат длины каждой проекции.
- в) Как распределён квадрат длины проекции в каждом случае, если дополнительно известно, что вектор  $u$  имеет многомерное стандартное нормальное распределение?

**4.3** Храбрая исследовательница Евлампия оценивает модель множественной регрессии  $\hat{y} = X\hat{\beta}$ . Однако на самом деле  $\beta_0$ , и  $y = u$ , где  $u_i$  независимы и нормальны  $u_i \sim \mathcal{N}(0; \sigma^2)$ .

Какое распределение в регрессии Евлампии имеют  $\bar{y}, \sum y_i^2/\sigma^2, \sum \hat{y}_i^2/\sigma^2, n\bar{y}^2/\sigma^2, TSS/\sigma^2, RSS/\sigma^2, ESS/\sigma^2$ ?

**4.4** Компоненты вектора  $x = (x_1, x_2)'$  независимы и имеют стандартное нормальное распределение. Вектор  $y$  задан формулой  $y = (2x_1 + x_2 + 2, x_1 - x_2 - 1)$ .

- а) Выпишите совместную функцию плотности вектора  $x$ ;
- б) Нарисуйте на плоскости линии уровня функции плотности вектора  $x$ ;
- в) Выпишите совместную функцию плотности вектора  $y$ ;
- г) Найдите собственные векторы и собственные числа ковариационной матрицы вектора  $y$ ;
- д) Нарисуйте на плоскости линии уровня функции плотности вектора  $y$ .

**4.5** Компоненты вектора  $x = (x_1, x_2, x_3)'$  независимы и имеют стандартное нормальное распределение.

- а) Как выглядят в пространстве поверхности уровня совместной функции плотности?
- б) Рассмотрим три апельсина с кожурой одинаковой очень маленькой толщины: бэби-апельсин радиуса 0.1, стандартный апельсин радиуса 1 и гранд-апельсин радиуса 10. В кожуру какого апельсина вектор  $x$  попадает с наибольшей вероятностью?

- в) Мы проецируем случайный вектор на  $x$  на плоскость  $2x_1 + 3x_2 - 7x_3 = 0$ . Какое распределение имеет квадрат длины проекции?
- г) Введём вектор  $y$  независимый от  $x$  и имеющий такое же распределение. Спроецируем вектор  $x$  на плоскость проходящую через начало координат и перпендикулярную вектору  $y$ . Какое распределение имеет квадрат длины проекции?

## 5 МНК со статистическими предпосылками

**5.1** Исследовательница Мишель собрала данные по 20 студентам. Переменная  $y_i$  — количество решённых задач по эконометрике  $i$ -ым студентом, а  $x_i$  — количество просмотренных серий любимого сериала за прошедший год. Оказалось, что  $\sum y_i = 10$ ,  $\sum x_i = 0$ ,  $\sum x_i^2 = 40$ ,  $\sum y_i^2 = 50$ ,  $\sum x_i y_i = 60$ .

- а) Найдите МНК оценки коэффициентов парной регрессии.
- б) В рамках предположения  $\mathbb{E}(u_i | X) = 0$  найдите  $\mathbb{E}(y_i | X)$ ,  $\mathbb{E}(\hat{\beta}_j | X)$ ,  $\mathbb{E}(\hat{u}_i | X)$ ,  $\mathbb{E}(\hat{y}_i | X)$ .
- в) Предположим дополнительно, что  $\text{Var}(u_i | X) = \sigma^2$  и  $u_i$  при фиксированных  $X$  независимы. Найдите  $\text{Var}(y_i | X)$ ,  $\text{Var}(y_i(x_i - \bar{x}) | X)$ ,  $\text{Var}(\sum y_i(x_i - \bar{x}) | X)$ ,  $\text{Var}(\hat{\beta}_2 | X)$ .

**5.2** Рассмотрим классическую линейную модель  $y = X\beta + u$  с предпосылками Гаусса-Маркова:  $\mathbb{E}(u | X) = 0$ ,  $\text{Var}(u | X) = \sigma^2 I$ .

Для всех случайных векторов  $(y, \hat{y}, \hat{\beta}, u, \hat{u}, \bar{y})$  найдите  $\mathbb{E}(\cdot)$ ,  $\text{Var}(\cdot)$ ,  $\text{Cov}(\cdot, \cdot)$ .

**5.3** Пусть регрессионная модель  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \varepsilon_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , задана в матричном виде при помощи уравнения  $y = X\beta + \varepsilon$ , где  $\beta = (\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3)'$ . Известно, что  $\mathbb{E}\varepsilon = 0$  и  $\text{Var}(\varepsilon) = 4 \cdot I$ . Известно также, что:

$$y = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Для удобства расчётов ниже приведены матрицы:

$$X'X = \begin{pmatrix} 5 & 3 & 1 \\ 3 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad (X'X)^{-1} = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.5 & 0 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ 0 & -0.5 & 1.5 \end{pmatrix}.$$

- а) Найдите  $\mathbb{E}(\hat{\sigma}^2)$ ,  $\hat{\sigma}^2$ .
- б) Найдите  $\text{Var}(\varepsilon_1)$ ,  $\text{Var}(\beta_1)$ ,  $\text{Var}(\hat{\beta}_1)$ ,  $\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_1)$ ,  $\mathbb{E}(\hat{\beta}_1^2) - \beta_1^2$ ;
- в) Предполагая нормальность ошибок, постройте 95% доверительный интервал для  $\beta_2$ .
- г) Предполагая нормальность ошибок, проверьте гипотезу  $H_0: \beta_2 = 0$ ;
- д) Найдите  $\text{Cov}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)$ ,  $\widehat{\text{Cov}}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)$ ,  $\text{Var}(\hat{\beta}_2 - \hat{\beta}_3)$ ,  $\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_2 - \hat{\beta}_3)$ ;
- е) Найдите  $\text{Var}(\beta_2 - \beta_3)$ ,  $\text{Corr}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)$ ,  $\widehat{\text{Corr}}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)$ ;
- ж) Предполагая нормальность ошибок, проверьте гипотезу  $H_0: \beta_2 = \beta_3$ ;

**5.4** Начинаящий социолог Аполлон опросил 40 человек. В результате у него получилась одна количественная зависимая переменная и 15 регрессоров. Аполлон говорит «хочу построить модель».

Что можно посоветовать Аполлону?

**5.5** Рассмотрим модель  $y_i = \beta x_i + u_i$  с двумя наблюдениями,  $x_1 = 1$ ,  $x_2 = 2$ . Величины  $u_1$  и  $u_2$  независимы и равновероятно равны  $+1$  или  $-1$ .

- а) Найдите оценку  $\hat{\beta}_{\text{ols}}$  для  $\beta$  с помощью метода наименьших квадратов.

- б) Чему равна дисперсия  $\text{Var}(\hat{\beta}_{\text{ols}} | x)$  и ожидание  $\mathbb{E}(\hat{\beta}_{\text{ols}} | x)$ ?
- в) Постройте несмещённую оценку  $\hat{\beta}_{\text{best}}$  с наименьшей дисперсией.
- г) Чему равна дисперсия  $\text{Var}(\hat{\beta}_{\text{best}} | x)$ ?
- д) А как же теорема Гаусса — Маркова? Почему в данном примере удаётся построить оценку с дисперсией меньше, чем у оценки методом наименьших квадратов?

## 6 Гамма и бета распределения

**6.1** Вася делает эксперименты без устали со скоростью  $d$  экспериментов в минуту. Каждый эксперимент независимо от других может закончиться успехом с вероятностью  $p$  или неудачей.

Пусть  $X$  — количество успехов за первую минуту, а  $Y$  — номер опыта, в котором произошёл первый успех,  $Z$  — время, когда случился первый успех.

- а) Найдите  $\mathbb{P}(X = k)$ ,  $\mathbb{E}(X)$ ,  $\text{Var}(X)$ . Как называется закон распределения  $X$ ?
- б) Найдите  $\mathbb{P}(Y = k)$ ,  $\mathbb{E}(Y)$ ,  $\text{Var}(Y)$ . Как называется закон распределения  $Y$ ?
- в) Найдите  $\mathbb{P}(Z \leq t)$ ,  $\mathbb{E}(Z)$ ,  $\text{Var}(Z)$ .

Теперь Вася ускоряется и устремляет  $d$  в бесконечность. Из-за того, что он торопится,  $p$  начинает стремиться к нулю :) Причём ожидаемое количество успехов за минуту оказывается постоянно и равно  $\lambda$ .

- г) Выразите  $p$  через  $\lambda$  и  $d$ .
- д) Найдите предел  $\mathbb{P}(Z \leq t)$ . Является ли предельная функция  $\mathbb{P}(Z \leq t)$  непрерывной? Какая в предельном случае получается функция плотности у величины  $Z$ ? Как называется этот закон распределения  $Z$ ? Чему равен предел  $\mathbb{E}(Z)$  и  $\text{Var}(Z)$ ?
- е) Найдите предел вероятности  $\mathbb{P}(X = k)$  и пределы  $\mathbb{E}(X)$  и  $\text{Var}(X)$ . Как называется предельный закон распределения  $X$ ?

**6.2** Энтомолог Джон Поллак ловит бабочек. На поимку  $i$ -ой бабочки у него уходит  $Y_i$  минут, величины  $Y_i$  независимы. Каждая  $Y_i$  имеет экспоненциальное распределение с интенсивностью  $\lambda$  бабочек в минуту. Всего он решил поймать  $n$  бабочек. Рассмотрим величины  $S = Y_1 + \dots + Y_n$ ,  $X_1 = Y_1/S$ ,  $X_2 = Y_2/S$ , ...,  $X_{n-1} = Y_{n-1}/S$ .

- а) Выпишите совместную функцию плотности  $Y_1, \dots, Y_n$ ;
- б) Найдите совместную функцию плотности  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{n-1}, S$ .
- в) Зависит ли величина  $S$  и вектор  $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}$ ?
- г) С точностью до сомножителя выпишите функцию плотности  $S$ . Как называется закон распределения  $S$ ?
- д) С точностью до сомножителя выпишите совместную функцию плотности для  $X_1, \dots, X_{n-1}$ .

Рассмотрим также величины  $Z_1 = Y_1/(Y_1 + Y_2)$ ,  $Z_2 = (Y_1 + Y_2)/(Y_1 + Y_2 + Y_3)$ , ...,  $Z_{n-1} = (Y_1 + \dots + Y_{n-1})/(Y_1 + \dots + Y_n)$ .

- е) Найдите совместную функцию плотности  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{n-1}, S$ .
- ж) Зависимы ли величины  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{n-1}, S$ ?
- з) С точностью до константы найдите частную функцию плотности  $S$  и каждого  $Z_i$  в отдельности;

**6.3** Быстрый исследователь Вася снова проводит независимые идентичные опыты с очень высокой скоростью. В среднем  $\lambda$  опытов в минуту оказываются успешными. Поэтому время до очередного успеха можно считать экспоненциально распределённым, а время от начала до  $k$ -го успеха — имеющим гамма-распределение  $\text{Gamma}(k, \lambda)$ . На этот раз Вася решил дождаться  $k_1$  успеха, затем быстренько пообедать, а затем дождаться ещё  $k_2$  успехов. Пусть  $X_1$  — время от начала наблюдения до обеда, а  $X_2$  — время от обеда до конца опытов. Также введём  $S = X_1 + X_2$  и  $Z = X_1/S$  — долю времени до обеда от общего времени на опыты.

- а) Найдите совместную функцию плотности  $S$  и  $Z$  с точностью до константы.
- б) Являются ли  $S$  и  $Z$  независимыми случайными величинами?
- в) Найдите частные функции плотности  $S$  и  $Z$ .
- г) Как называется закон распределения  $S$ ?
- д) Как называется закон распределения  $Z$ ?
- е) Какой закон распределения имеет величина  $W = 1 - Z$ ?

**6.4** Васа оценивает регрессию  $y$  на регрессоры  $X$ , включающие константу, а на самом деле все коэффициенты  $\beta_j$  кроме константы равны нулю. Ошибки  $u_i$  распределены нормально  $\mathcal{N}(0; \sigma^2)$ . Какое распределение имеет  $R^2$ ?

## 7 Блочные матрицы

**7.1** Найдите матрицу  $M$  и укажите размеры всех блоков

- а) Блок  $C$  имеет размер  $p \times p$ , блок  $F$  — размер  $q \times q$

$$M = \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C & D \\ E & F \end{pmatrix}$$

- б) Блок  $C$  имеет размер  $p \times p$ , блок  $F$  — размер  $q \times q$

$$M = \begin{pmatrix} C & D \\ E & F \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}$$

- в) Блок  $C$  имеет размер  $p \times p$ , блок  $B$  — размер  $q \times q$

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^T$$

**7.2** Найдите обратную матрицу  $M^{-1}$  для каждого из случаев

- а) Блоки  $A_{p \times p}$  и  $B_{q \times q}$  обратимы,

$$M = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix}$$

- б) Блоки  $A_{p \times p}$  и  $B_{q \times q}$  обратимы,

$$M = \begin{pmatrix} 0 & A \\ B & 0 \end{pmatrix}$$

- в) Блоки  $A_{p \times p}$  и  $B_{q \times q}$  обратимы,

$$M = \begin{pmatrix} A & C \\ 0 & B \end{pmatrix}$$

- г) Блоки  $A_{p \times p}$  и  $B_{q \times q}$  обратимы,

$$M = \begin{pmatrix} A & 0 \\ C & B \end{pmatrix}$$

**7.3** Блоки  $A_{p \times p}$  и  $B_{q \times q}$  обратимы, матрица  $M$  имеет вид

$$M = \begin{pmatrix} A & C \\ D & B \end{pmatrix}$$

Рассмотрим обратную матрицу  $M^{-1}$

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} X & Z \\ Y & W \end{pmatrix}$$

- а) Найдите блок  $X$  с помощью процедуры Гаусса;
- б) Найдите блок  $X$  решив систему двух уравнений на блоки  $X$  и  $Y$ ;
- в) Докажите тождество Вудберри

$$(A - CB^{-1}D)^{-1} = A^{-1} + A^{-1}C(B - DA^{-1}C)^{-1}DA^{-1}$$

**7.4** Матрица регрессоров  $X$  состоит из двух блоков,  $X = \begin{pmatrix} L & R \end{pmatrix}$ .

- а) Из каких блоков состоит матрица  $X'X$ ?
- б) Из каких блоков состоит матрица  $(X'X)^{-1}$ ?

## 8 Приятно-следственные связи, CUPED

**8.1** Предположим, что  $w_i$  не зависим с гипотетическими значениями  $y_i(0)$  и  $y_i(1)$ .

Верно ли, что  $ATE = \mathbb{E}(y_i(1) - y_i(0))$  можно записать как  $\mathbb{E}(y_i | w_i = 1) - \mathbb{E}(y_i | w_i = 0)$ ?

**8.2** Предположим, что  $y_i = \beta_1 + \delta w_i + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i^2 + u_i$ , выполнены классические предпосылки на  $u_i$ :  $\mathbb{E}(u_i | X) = 0$ ,  $\text{Var}(u_i | X) = \sigma^2$ ,  $\text{Cov}(u_i, u_j | X) = 0$ . Наблюдения представляют собой случайную выборку, четвёртые моменты всех упомянутых случайных величин конечны.

Здесь  $w_i \in \{0, 1\}$  — индикатор того, что индивид получил воздействие в рамках рандомизированного эксперимента,  $x_i$  — характеристика индивида, а  $y_i$  — интересующая переменная.

- а) Чему равны  $\text{Cov}(w_i, x_i | X)$  и  $\text{Cov}(w_i, u_i | X)$ , если рандомизированный эксперимент корректно проведён?
- б) Агнесса использует простую регрессию  $\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\delta}_a w_i$ . Верно ли, что оценка Агнессы  $\hat{\delta}_a$  будет несмещённой и состоятельной?
- в) Бриджит использует разницу средних

$$\hat{\delta}_b = \frac{\sum_{w_i=1} y_i}{n_1} - \frac{\sum_{w_i=0} y_i}{n_0}.$$

Верно ли, что оценка Бриджит  $\hat{\delta}_b$  будет несмещённой и состоятельной?

- г) Василиса использует множественную регрессию

$$\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\delta}_c w_i + \hat{\gamma} x_i.$$

Верно ли, что оценка Василисы  $\hat{\delta}_c$  будет несмещённой и состоятельной?

**8.3** Предположим, что  $y_i = \beta_1 + \delta w_i + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i^2 + u_i$ , выполнены классические предпосылки на  $u_i$ :  $\mathbb{E}(u_i | X) = 0$ ,  $\text{Var}(u_i | X) = \sigma^2$ ,  $\text{Cov}(u_i, u_j | X) = 0$ . Наблюдения представляют собой случайную выборку, четвёртые моменты всех упомянутых случайных величин конечны.

Здесь  $w_i \in \{0, 1\}$  — индикатор того, что индивид получил воздействие в рамках рандомизированного эксперимента,  $x_i$  — характеристика индивида, а  $y_i$  — интересующая переменная.

Василиса использует множественную регрессию

$$\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\delta}_c w_i + \hat{\gamma} x_i.$$

Галатея использует CUPED. Для этого на первом шаге она оценивает множественную регрессию Василисы. Затем Галатея создаёт новую переменную, очищая зависимую переменную  $y_i$  от эффекта  $x_i$ ,  $r_i = y_i - \hat{\gamma} x_i$ .

На втором шаге Галатея оценивает парную регрессию  $\hat{r}_i = \hat{\mu} + \hat{\delta}_d w_i$ .

- а) Верно ли, что оценки  $\hat{\mu}$  и  $\hat{\alpha}$  совпадают?
- б) Верно ли, что оценки  $\hat{\delta}_c$  и  $\hat{\delta}_d$  совпадают?
- в) Верно ли, что совпадают суммы квадратов остатков в двух регрессиях Галатеи?
- г) Верно ли, что совпадают классические стандартные ошибки  $se(\hat{\delta}_c)$  и  $se(\hat{\delta}_d)$ ?

## 9 Максимально правдоподобно

**9.1** Рассмотрим модель регрессии с одним параметром,  $y_i = \beta x_i + u_i$ , где  $x_i$  неслучайны и не все равны нулю, а  $u_i$  нормальны  $\mathcal{N}(0; \sigma^2)$  и независимы.

Рассмотрим варианты предпосылок:

- а) Величина  $\sigma^2$  известна, и исследователь хочет проверить гипотезу  $H_0: \beta = 7$  против  $H_a: \beta \neq 7$ .
- б) Величина  $\beta$  известна, и исследователь хочет проверить гипотезу  $H_0: \sigma^2 = 1$  против  $H_a: \sigma^2 \neq 1$ .
- в) Величины  $\sigma^2$  и  $\beta$  неизвестны, и исследователь хочет проверить гипотезу  $H_0: \beta = 7$  против  $H_a: \beta \neq 7$ .
- г) Величины  $\sigma^2$  и  $\beta$  неизвестны, и исследователь хочет проверить гипотезу  $H_0: \beta = 7, \sigma^2 = 1$  против  $H_a: \beta \neq 7$  или  $\sigma^2 \neq 1$ .

Для каждого варианта предпосылок:

- а) Найдите функцию правдоподобия  $\ell(\theta)$ , её градиент  $s(\theta)$ , матрицу Гессе  $H(\theta)$ , теоретическую информацию Фишера  $I(\theta)$ .
- б) Найдите  $\hat{\theta}_{UR}, \hat{\theta}_R, \ell(\hat{\theta}_{UR}), \ell(\hat{\theta}_R), s(\hat{\theta}_{UR}), s(\hat{\theta}_R)$ .
- в) Выпишите формулу для  $RSS_R$  и  $RSS_{UR}$ .
- г) Найдите оценку информации Фишера  $\hat{I}_R, \hat{I}_{UR}$  подставив в теоретическую информацию Фишера оценённые параметры.
- д) Выведите формулы для  $LR, LM$  и  $W$  статистики. Можно выражать их через  $RSS_R$  и  $RSS_{UR}$ .
- е) Упорядочьте статистики по возрастанию.

**9.2** Величины  $y_1, y_2, \dots, y_n$  независимы и экспоненциально распределены с параметром  $\lambda$ . По выборке из 100 наблюдений оказалось, что  $\sum y_i = 200$ . Исследователь Андреас хочет проверить гипотезу  $H_0: \mathbb{E}(y_i) = 1$  против альтернативной  $\mathbb{E}(y_i) \neq 1$ .

- а) Выпишите логарифмическую функцию правдоподобия  $\ell(\lambda)$ ;
- б) Найдите оценку  $\hat{\lambda}$  методом максимального правдоподобия в общем виде и для имеющейся выборки;
- в) Найдите теоретическую информацию Фишера  $I(\lambda)$  для  $n$  наблюдений;
- г) Выведите формулы для статистик отношения правдоподобия, множителей Лагранжа и Вальда в общем виде;
- д) Найдите значения статистик отношения правдоподобия, множителей Лагранжа и Вальда для имеющейся выборки;
- е) Проверьте гипотезу  $H_0$  с помощью трёх статистик.

**9.3** Рассмотрим модель простой регрессии  $y_i = \beta x_i + u_i$ , где ошибки  $u_i$  независимы и имеют стандартное нормальное распределение,  $u_i \sim \mathcal{N}(0; 1)$ . По выборке из 100 наблюдений оказалось, что  $\sum x_i^2 = 100$ ,  $\sum y_i^2 = 900$ , а  $\sum y_i x_i = 250$ . Исследователь Рамирес хочет проверить  $H_0: \beta = 0$ .

- а) Выпишите логарифмическую функцию правдоподобия  $\ell(\beta)$ ;
- б) Найдите оценку  $\hat{\beta}$  методом максимального правдоподобия в общем виде и для имеющейся выборки;

- в) Найдите теоретическую информацию Фишера  $I(\beta)$  для  $n$  наблюдений;
- г) Выведите формулы для статистик отношения правдоподобия, множителей Лагранжа и Вальда в общем виде;
- д) Найдите значения статистик отношения правдоподобия, множителей Лагранжа и Вальда для имеющейся выборки;
- е) Проверьте гипотезу  $H_0$  с помощью трёх статистик.

**9.4** Исследовательница Геральдина заглядывает  $n$  раз в случайные аудитории бывшей шпульно-катушечной фабрики. В каждой аудитории независимо от других идёт семинар по теории вероятностей, эконометрике, микро или макро. Пусть  $p_1, p_2, p_3$  — это вероятности семинаров по теории вероятностей, эконометрике и микро. Вероятность семинара по макро мы отдельным параметром не вводим, так как иначе параметры будут зависимы и нужно будет искать ограниченный экстремум правдоподобия. Пусть  $y_1, y_2, y_3$  — количество попаданий Геральдины на теорию вероятностей, эконометрику и микро.

По выборке из 100 наблюдений оказалось, что  $y_1 = 20, y_2 = 30, y_3 = 20$ . Геральдина предполагает, что все четыре дисциплины равновероятны.

- а) Выпишите логарифмическую функцию правдоподобия  $\ell(p)$ ;
- б) Найдите оценку  $\hat{p}$  методом максимального правдоподобия в общем виде и для имеющейся выборки;
- в) Найдите теоретическую информацию Фишера  $I(p)$  для  $n$  наблюдений;
- г) Найдите явно  $I^{-1}(p)$ ;
- д) Выведите формулы для статистик отношения правдоподобия, множителей Лагранжа и Вальда в общем виде;
- е) Найдите значения статистик отношения правдоподобия, множителей Лагранжа и Вальда для имеющейся выборки;
- ж) Проверьте гипотезу  $H_0$  с помощью трёх статистик на уровне значимости 5%.
- з) (\*) Обобщите формулы трёх статистик на случай произвольного количества дисциплин и произвольной гипотезы  $H_0: p = p^0$ .

**9.5** Логарифмическая функция правдоподобия имеет вид

$$\ell(\theta) = a - \frac{1}{2}(\theta - h(y))'Q(\theta - h(y)),$$

где  $Q$  — постоянная симметричная матрица, а  $h(y)$  — функция от выборки. Вектор параметров  $\theta$  состоит из двух блоков, а матрица  $Q$  — из четырёх блоков

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} A & B \\ B^T & C \end{pmatrix}$$

Настырный исследователь Никанор хочет проверить гипотезу  $H_0: \theta_1 = \theta_1^0$  про часть параметров, входящих в вектор  $\theta$ ;

- а) Найдите неограниченную оценку метода максимального правдоподобия  $\hat{\theta}^{UR}$ ;
- б) Найдите ограниченную оценку метода максимального правдоподобия  $\hat{\theta}^R$ ;
- в) Выведите формулу для  $LR$  статистики;
- г) Выведите формулу для  $LM$  статистики;
- д) Выведите формулу для  $W$  статистики;
- е) Какие из указанных формул равны?



**9.6** Рассмотрим модель множественной регрессии  $y = X\beta + u$ , где регрессоры детерминистические, ошибки имеют многомерное нормальное распределение, а ковариационная матрица  $\text{Var}(u)$  единичная. Разобьём вектор коэффициентов  $\beta$  на две части

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}$$

а) Докажите, что логарифмическая функция правдоподобия представима в виде

$$\ell(\theta) = a - \frac{1}{2}(\theta - h(y))'Q(\theta - h(y)),$$

б) Явно найдите матрицу  $Q$  и функцию  $h(y)$ ;

в) Выведите формулу для  $LR$ ,  $LM$  и теста Вальда для проверки гипотезы  $H_0: \beta_1 = \beta_1^0$ ;

г) Как найденная формула отличается от обычной  $F$  статистики?

д) Как найденная формула упрощается для случая проверки гипотезы о незначимости регрессии в целом?

**9.7** Рассмотрим модель множественной регрессии  $y = X\beta + u$ , где регрессоры детерминистические, ошибки имеют многомерное нормальное распределение, а ковариационная матрица  $\text{Var}(u) = \sigma^2 I$ . Разобьём вектор коэффициентов  $\beta$  на две части

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}$$

а) Докажите, что логарифмическая функция правдоподобия представима в виде

$$\ell(\theta) = a + (\theta - h(y))'Q(\theta - h(y)),$$

б) Явно найдите матрицу  $Q$  и функцию  $h(y)$ ;

в) Выведите формулы для  $LR$ ,  $LM$  и теста Вальда для проверки гипотезы  $H_0: \beta_1 = \beta_1^0$ ;

г) Как найденные формулы отличаются от обычной  $F$  статистики?

д) Как найденные формулы упрощаются для случая проверки гипотезы о незначимости регрессии в целом?

**9.8** Рассмотрим  $LR$ ,  $LM$  и  $W$  статистики в задаче оценки параметров модели  $y = X\beta + u$ , с нормальными ошибками  $u \sim \mathcal{N}(0; \sigma^2 \cdot I)$  и неизвестной  $\sigma^2$ .

Известно, что при проверке гипотезы о линейных ограничениях на  $\beta$  оказывается, что

$$\begin{cases} LR = n \ln s \\ W = n(s - 1) \\ LM = n(s - 1)/s \end{cases},$$

где  $s = RSS_R / RSS_{UR}$ .

Докажите, что  $LM \leq LR \leq W$ .

**9.9** Рассмотрим  $LR$ ,  $LM$  и  $W$  статистики в задаче оценки параметров модели  $y = X\beta + u$ , с нормальными ошибками  $u \sim \mathcal{N}(0; \sigma^2 \cdot I)$  и неизвестной  $\sigma^2$ .

Известно, что при проверке гипотезы о линейных ограничениях на  $\beta$  оказывается, что

$$\begin{cases} LR = n \ln s \\ W = n(s - 1) \\ LM = n(s - 1)/s \end{cases},$$



где  $s = RSS_R / RSS_{UR}$ .

Эконометресса Фиалка по 60 наблюдениям проверяет гипотезу о равенстве пяти параметров нулю в регрессии с десятью параметрами  $\beta$  при 5%-м уровне значимости.

Найдите точные критические значения для  $LR$ ,  $LM$  и  $W$  и сравните их с асимптотическими.

## 10 Гетероскедастичность

### 10.1 Имеется три наблюдения

$x_i$	1	2	2
$y_i$	1	2	3

Эконометр Антоний хочет оценить зависимость  $y_i = \beta x_i + u_i$ .

- Найдите оценку  $\hat{\beta}$  с помощью МНК;
- Найдите стандартную ошибку  $se(\hat{\beta})$  предполагая гомоскедастичность;
- Найдите робастные к гетероскедастичности стандартные ошибки  $se_{HC0}(\hat{\beta})$  и  $se_{HC3}(\hat{\beta})$ ;
- Найдите эффективную оценку  $\hat{\beta}$ , если дополнительно известно, что  $\text{Var}(u_i | x_i) = \sigma^2(3x_i - 2)$ ;
- Найдите эффективную оценку  $\hat{\beta}$ , если дополнительно известно, что

$$\text{Var}(u | X) = \begin{pmatrix} 4\sigma^2 & -\sigma^2 & 0 \\ -\sigma^2 & 9\sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 \end{pmatrix}$$

### 10.2 Известно, что после деления каждого уравнения регрессии $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \varepsilon_i$ на $x_i^2$ гетероскедастичность ошибок была устранена. Какой вид имела дисперсия ошибок, $\text{Var}(\varepsilon_i)$ ?

### 10.3 Для линейной регрессии $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 z_i + \varepsilon_i$ была выполнена сортировка наблюдений по возрастанию переменной $x$ . Исходная модель оценивалась по разным частям выборки:

Выборка	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$RSS$
$i = 1, \dots, 30$	1.21	1.89	2.74	48.69
$i = 1, \dots, 11$	1.39	2.27	2.36	10.28
$i = 12, \dots, 19$	0.75	2.23	3.19	5.31
$i = 20, \dots, 30$	1.56	1.06	2.29	14.51

Известно, что ошибки в модели являются независимыми нормальными случайными величинами с нулевым математическим ожиданием. Протестируйте ошибки на гетероскедастичность на уровне значимости 5%.

### 10.4 Рассмотрим линейную регрессию $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 z_i + \varepsilon_i$ по 50 наблюдениям. При оценивании с помощью МНК были получены результаты: $\hat{\beta}_1 = 1.21$ , $\hat{\beta}_2 = 1.11$ , $\hat{\beta}_3 = 3.15$ , $R^2 = 0.72$ .

Оценена также вспомогательная регрессия:  $\hat{\varepsilon}_i^2 = \delta_1 + \delta_2 x_i + \delta_3 z_i + \delta_4 x_i^2 + \delta_5 z_i^2 + \delta_6 x_i z_i + u_i$ . Результаты оценивания следующие:  $\hat{\delta}_1 = 1.50$ ,  $\hat{\delta}_2 = -2.18$ ,  $\hat{\delta}_3 = 0.23$ ,  $\hat{\delta}_4 = 1.87$ ,  $\hat{\delta}_5 = -0.56$ ,  $\hat{\delta}_6 = -0.09$ ,  $R_{aux}^2 = 0.36$

Известно, что ошибки в модели являются независимыми нормальными случайными величинами с нулевым математическим ожиданием. Протестируйте ошибки на гетероскедастичность на уровне значимости 5%.

### 10.5 Найдите число коэффициентов во вспомогательной регрессии, необходимой для выполнения теста Уайта, если число коэффициентов в исходной регрессии равно $k$ , включая свободный член.

### 10.6 Рассмотрим модель регрессии $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 z_i + \varepsilon_i$ , в которой ошибки $\varepsilon_i$ независимы и имеют нормальное распределение $N(0, \sigma^2)$ . Для $n = 200$ наблюдений найдите

- а) вероятность того, что статистика Уайта окажется больше 10;
- б) ожидаемое значение статистики Уайта;
- в) дисперсию статистики Уайта.

**10.7** Рассматривается модель  $y_t = \beta_1 + \varepsilon_t$ , где ошибки  $\varepsilon_t$  — независимые случайные величины с  $\mathbb{E}(\varepsilon_t) = 0$  и  $\text{Var}(\varepsilon_t) = t$ . Найдите наиболее эффективную оценку неизвестного параметра  $\beta_1$  в классе линейных по  $y$  и несмещённых оценок.

**10.8** Эконометр Антоний исследует зависимость надоя коров в литрах в год,  $y_i$ , от дамми-переменной  $x_i$ , отвечающей за прослушивание коровами ежедневно Девятой симфонии,  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + u_i$ . Антоний раздобыл следующие данные:

Подвыборка	Размер	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$
$x_i = 0$	$n_0 = 100$	200	4000
$x_i = 1$	$n_1 = 100$	300	5000

- а) Найдите МНК-оценки  $\beta_1$  и  $\beta_2$ ;
- б) Постройте 95%-ый доверительный интервал для  $\beta_2$  предполагая гомоскедастичность  $u_i$ ;
- в) Найдите робастную к гетероскедастичности оценку  $\widehat{\text{Var}}_{HC0}(\hat{\beta})$ ;
- г) Найдите робастную к гетероскедастичности оценку  $\widehat{\text{Var}}_{HC3}(\hat{\beta})$ ;
- д) Постройте 95%-ый доверительный интервал для  $\beta_2$  с помощью скорректированной  $se_{HC0}(\hat{\beta}_2)$ ;
- е) Дополнительно предположив, что  $\text{Var}(u_i | x_i) = \sigma^2(1 + 3x_i)$ , найдите эффективную оценку  $\hat{\beta}_2$  и постройте доверительный интервал для неё.

**10.9** Эконометресса Прасковья использует традиционную оценку ковариационной матрицы, а эконометресса Мелони — оценку Уайта.

Какие оценки дисперсии  $\hat{\beta}_1$  и формулы для  $t$ -статистики получают Прасковья и Мелони в модели  $y_i = \beta_1 + u_i$ ?

**10.10** Эконометресса Прасковья использует традиционную оценку ковариационной матрицы, а эконометресса Мелони — оценку Уайта.

Обе эконометрессы оценивают модель  $y_i = \beta_1 + \beta_2 d_i + u_i$ , где  $d_i$  — дамми-переменная, равна 0 или 1. Дамми-переменная делит выборку на две части. Обозначим количество наблюдений в «нулевой» части как  $n_0$ , среднее — как  $\bar{y}_0$ , и общую сумму квадратов — как  $TSS_0$ . Аналогичные величины для «единичной» части выборки —  $n_1$ ,  $\bar{y}_1$  и  $TSS_1$ . И для всей выборки —  $n$ ,  $\bar{y}$ ,  $TSS$ .

- а) Найдите оценки  $\hat{\beta}_1$  и  $\hat{\beta}_2$ .
- б) Найдите оценки  $\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_1)$  и  $\widehat{\text{Var}}_W(\hat{\beta}_1)$ . Верно ли, что  $\widehat{\text{Var}}_W(\hat{\beta}_1) \geq \widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_1)$ ?
- в) Найдите оценки  $\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_2)$  и  $\widehat{\text{Var}}_W(\hat{\beta}_2)$ . Верно ли, что  $\widehat{\text{Var}}_W(\hat{\beta}_2) \geq \widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_2)$ ?
- г) Найдите оценки  $\widehat{\text{Cov}}(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2)$  и  $\widehat{\text{Cov}}_W(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2)$ .
- д) Найдите оценки  $\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2)$  и  $\widehat{\text{Var}}_W(\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2)$ .

**10.11** В модели  $y_i = \beta x_i + \varepsilon_i$  предполагается гетероскедастичность вида  $\text{Var}(\varepsilon_i) = \exp(\gamma_1 + \gamma_2 x_i)$  и нормальность ошибок.

- а) Сформулируйте гипотезу о гомоскедастичности с помощью коэффициентов.
- б) Выведите в явном виде оценку максимального правдоподобия при предположении о гомоскедастичности.
- в) Выпишите условия первого порядка для оценки максимального правдоподобия без предположения о гомоскедастичности.
- г) Выведите в явном виде формулу для LM теста множителей Лагранжа.

**10.12** Для регрессии  $y = X\beta + \varepsilon$  с  $\mathbb{E}(\varepsilon) = 0$ ,  $\text{Var}(\varepsilon) = \Sigma \neq \sigma^2 I$ , оцененной с помощью обобщённого метода наименьших квадратов, найдите ковариационную матрицу  $\text{Cov}(\hat{\beta}_{GLS}, \varepsilon)$

**10.13** В оригинальном тесте Бройша-Пагана на гетероскедастичность два шага. Сначала строится основная регрессия  $y_i$  на некоторые регрессоры и получаются остатки  $\hat{u}_i$ . На втором шаге строится регрессия квадрата остатков  $\hat{u}_i$  на переменные, от которых потенциально зависит условная дисперсия  $\text{Var}(u_i | Z)$ . Статистика Бройша-Пагана считается как  $BP = ESS/2$ , где  $ESS$  — объяснённая сумма квадратов регрессии второго шага. Оригинальный тест Уайта считается как  $W = nR^2$ , где  $R^2$  — коэффициент детерминации регрессии второго шага.

- Найдите отношение  $\frac{nR^2}{ESS/2}$ ;
- Найдите предел по вероятности  $\text{plim} \frac{nR^2}{ESS/2}$ ;
- Какое распределение имеют статистики  $BP$  и  $W$ ?
- Какой вид имеет статистика множителей Лагранжа?

распотрошить статью BP на задачу, статья о похожести BP и W, отдельно Коэнкера про студентизированную версию

## 11 Логит, пробит и хоббит!

**11.1** Бандерлог из Лога оценил логистическую регрессию по четырём наблюдениям и одному признаку с константой, получил  $b_i = \hat{\mathbb{P}}(y_i = 1 | x_i)$ , но потерял последнее наблюдение:

$y_i$	$b_i$
1	0.7
-1	0.2
-1	0.3
?	?

- Выпишите функцию правдоподобия для задачи логистической регрессии.
- Выпишите условие первого порядка по коэффициенту перед константой.
- Помогите бандерлогу восстановить пропущенные значения!

**11.2** Рассмотрим логистическую функцию  $\Lambda(w) = e^w / (1 + e^w)$ .

- Как связаны между собой  $\Lambda(w)$  и  $\Lambda(-w)$ ?
- Как связаны между собой  $\Lambda'(w)$  и  $\Lambda'(-w)$ ?
- Постройте графики функций  $\Lambda(w)$  и  $\Lambda'(w)$ .
- Найдите  $\Lambda(0)$ ,  $\Lambda'(0)$ ,  $\ln \Lambda(0)$ .
- Найдите обратную функцию  $\Lambda^{-1}(p)$ .
- Как связаны между собой  $\frac{d \ln \Lambda(w)}{dw}$  и  $\Lambda(-w)$ ?
- Как связаны между собой  $\frac{d \ln \Lambda(-w)}{dw}$  и  $\Lambda(w)$ ?
- Разложите  $h(\beta_1, \beta_2) = \ln \Lambda(y_i(\beta_1 + \beta_2 x_i))$  в ряд Тейлора до второго порядка в окрестности точки  $\beta_1 = 0, \beta_2 = 0$ .

**11.3** Винни-Пух знает, что мёд бывает правильный,  $\text{honey}_i = 1$ , и неправильный,  $\text{honey}_i = 0$ . Пчёлы также бывают правильные,  $\text{bee}_i = 1$ , и неправильные,  $\text{bee}_i = 0$ . По 100 своим попыткам добыть мёд Винни-Пух составил таблицу сопряженности:

	$\text{honey}_i = 1$	$\text{honey}_i = 0$
$\text{bee}_i = 1$	12	36
$\text{bee}_i = 0$	32	20

Винни-Пух использует логистическую регрессию с константой для прогнозирования правильности мёда с помощью правильности пчёл.

- Какие оценки коэффициентов получит Винни-Пух?
- Какой прогноз вероятности правильности мёда при встрече с неправильными пчёлами даёт логистическая модель? Как это число можно посчитать без рассчитывания коэффициентов?
- Проверьте гипотезу о том, что правильность пчёл не оказывает влияние на правильность мёда с помощью тестов LR, LM и W.

**11.4** Винни-Пух оценил логистическую регрессию для прогнозирования правильности мёда от высоты дерева (м)  $x_i$  и удалённости от дома (км)  $z_i$ :  $\ln odds_i = 2 + 0.3x_i - 0.5z_i$ .

- Оцените вероятность того, что  $y_i = 1$  для  $x = 15, z = 3.5$ .
- Оцените предельный эффект увеличения  $x$  на единицу на вероятность того, что  $y_i = 1$  для  $x = 15, z = 3.5$ .
- При каком значении  $x$  предельный эффект увеличения  $x$  на единицу в точке  $z = 3.5$  будет максимальным?

**11.5** Придумайте такие три наблюдения для парной логистической регрессии, чтобы все  $x_i$  были разными, не все  $y_i$  были одинаковые, а оценки логит-модели не существовали.

Какое решение задачи этой проблемы разумно предложить при большом количестве наблюдений?

**11.6** При оценке логит модели  $\mathbb{P}(y_i = 1) = \Lambda(\beta_1 + \beta_2 x_i)$  по 500 наблюдениям оказалось, что  $\hat{\beta}_1 = 0.7$  и  $\hat{\beta}_2 = 3$ . Оценка ковариационной матрицы коэффициентов имеет вид

$$\begin{pmatrix} 0.04 & 0.01 \\ 0.01 & 0.09 \end{pmatrix}$$

- Проверьте гипотезу о незначимости коэффициента  $\hat{\beta}_2$ .
- Найдите предельный эффект роста  $x_i$  на вероятность  $\mathbb{P}(y_i = 1)$  при  $x_i = -0.5$ .
- Найдите максимальный предельный эффект роста  $x_i$  на вероятность  $\mathbb{P}(y_i = 1)$ .
- Постройте точечный прогноз вероятности  $\mathbb{P}(y_i = 1)$  если  $x_i = -0.5$ .
- Найдите стандартную ошибку построенного прогноза.
- Постройте 95%-ый доверительный интервал для  $\mathbb{P}(y_i = 1)$  двумя способами (через преобразование интервала для  $\hat{y}_i^*$  и через дельта-метод).

**11.7** Почему в пробит-модели предполагается, что  $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0; 1)$ , а не  $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0; \sigma^2)$  как в линейной регрессии?

**11.8** Что произойдёт с оценками логит-модели  $\mathbb{P}(y_i = 1) = \Lambda(\beta_1 + \beta_2 x_i)$ , их стандартными ошибками, если у зависимой переменной поменять 0 и 1 местами?

**11.9** Исследователь Матвей оценил логит-модель по 10 тысячам наблюдений,  $\hat{\mathbb{P}}(y_i = 1) = \Lambda(-0.5 + 1.2x_i)$ . Переменная  $x_i$  — бинарная, 4 тысячи единиц и 6 тысяч нулей.

- Сколько наблюдений с  $y_i = 1$ ?
- Сколько наблюдений с  $y_i = 1$  и  $x_i = 0$ ?
- Сколько наблюдений с  $y_i = 0$  и  $x_i = 1$ ?

**11.10** Если выбрать покемона наугад, то с вероятностью  $p$  покемон окажется ядовитым, а с вероятностью  $(1 - p)$  — не ядовитым. Вес ядовитых покемонов распределен нормально,  $\mathcal{N}(\mu_1, \sigma^2)$ , а вес неядовитых — нормально с другим ожиданием и той же дисперсией,  $\mathcal{N}(\mu_2, \sigma^2)$ .

Охотник Джон только что поймал покемона и взвесил его.

- а) Найдите условную вероятность того, что покемон ядовит, если его вес равен  $x$ .  
 б) Запишите найденную условную вероятность в виде

$$\mathbb{P}(\text{покемон ядовит} \mid x) = F(\beta_1 + \beta_2 x),$$

где  $F$  — некая функция распределения. Выразите  $\beta_1$  и  $\beta_2$  через исходные параметры. Как называется функция  $F$ ?

**11.11** Три богатыря в дальнем походе раздобыли набор данных в котором и зависимая переменная и предикторы — бинарные. Илья Муромец оценивает логит-модель. Добрыня Никитич использует обычный МНК. Алёша Попович строит классификационное дерево максимально возможной длины, используя энтропию для деления узла на два. Змей Горыныч, раздобывший тот же набор данных, использует пробит модель.

Как между собой соотносятся прогнозы вероятностей у трёх богатырей и Змея?

## 12 Эндогенность

Прочесть про инструментальные переменные можно, например, в [Sch].

**12.1** Величины  $x_i$ ,  $z_i$  и  $u_i$  имеют совместное распределение, задаваемое табличкой:

$x_i$	0	1	0	1
$z_i$	0	1	0	0
$u_i$	-1	-1	1	1
Вероятность	0.2	0.3	0.3	0.2

Рассмотрим модель  $y_i = \beta x_i + u_i$ .

- а) Найдите  $\text{plim } \hat{\beta}_{OLS}$ ;  
 б) Найдите  $\text{plim } \hat{\beta}_{IV}$ , если в качестве инструмента для  $x_i$  используется  $z_i$ ;

**12.2** Рассмотрим три вектора:  $y$ ,  $x$  и  $z$ . Проведем гипер-плоскость ортогональную  $z$  через конец вектора  $y$ . Эта гипер-плоскость пересекает прямую порождаемую вектором  $x$  в точке  $\hat{\beta}_{IV}x$ .

Исходя из данного геометрического определения  $\hat{\beta}_{IV}$ :

- а) Выведите алгоритм двухшагового МНК;  
 б) Выведите явную формулу для  $\hat{\beta}_{IV}$ ;  
 в) Докажите, что оценка  $\hat{\beta}_{IV}$  показывает, насколько в среднем растёт  $y$  при таком росте  $z$ , при котором  $x$  в среднем растёт на единицу.

сказать смысл IV попроще? на две фразы?

**12.3** Рассмотрим модель  $y_i = \beta x_i + u_i$ . Исследовательница Мишель строит оценку  $\hat{\beta}_{IV}$  в регрессии  $y$  на  $x$  с инструментом  $z$ . Исследовательница Аграфена строит обычную МНК оценку в регрессии  $\hat{y} = \hat{\beta}_x x + \hat{\beta}_w w$ .

- а) Выразите  $w$  через  $x$ ,  $z$  и  $y$  так, чтобы оценка  $\hat{\beta}_{IV}$  Мишель и оценка  $\hat{\beta}_x$  Аграфены совпали.  
 б) Сформулируйте ещё одну интерпретацию оценки  $\hat{\beta}_{IV}$ ;

**12.4** Величины  $x_i$ ,  $z_i$  и  $u_i$  имеют совместное распределение, параметры которого известны:

$$\text{Var} \left( \begin{pmatrix} x_i \\ z_i \\ u_i \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 5 & 1 & -1 \\ 1 & 9 & 0 \\ -1 & 0 & 4 \end{pmatrix}; \quad \mathbb{E} \left( \begin{pmatrix} x_i \\ z_i \\ u_i \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Наблюдения с разными номерами независимы и одинаково распределены.

Рассмотрим модель  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + u_i$ .

- а) Найдите  $\text{plim } \hat{\beta}_2^{LS}$  и  $\text{plim } \hat{\beta}_1^{LS}$ ; Являются ли оценки состоятельными?
- б) Храбрый исследователь Афанасий использует двухшаговый МНК. На первом шаге он строит регрессию  $x_i$  на константу и  $z_i$ ,  $\hat{x}_i = \hat{\gamma}_1 + \hat{\gamma}_2 z_i$ . А на втором регрессию  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1^{IV} + \hat{\beta}_2^{IV} \hat{x}_i$ . Найдите  $\text{plim } \hat{\beta}_2^{IV}$  и  $\text{plim } \hat{\beta}_1^{IV}$ ; Являются ли оценки состоятельными?
- в) Как изменятся  $\text{plim } \hat{\beta}_2^{IV}$  и  $\text{plim } \hat{\beta}_1^{IV}$ , если Афанасий забудет включить константу на первом шаге?

**12.5** Приведите примеры дискретных случайных величин  $\varepsilon$  и  $x$ , таких, что

- а)  $\mathbb{E}(\varepsilon) = 0$ ,  $\mathbb{E}(\varepsilon | x) = 0$ , но величины зависимы. Чему в этом случае равно  $\text{Cov}(\varepsilon, x)$ ?
- б)  $\mathbb{E}(\varepsilon) = 0$ ,  $\text{Cov}(\varepsilon, x) = 0$ , но  $\mathbb{E}(\varepsilon | x) \neq 0$ . Зависимы ли эти случайные величины?

**12.6** Эконометресса Агнесса хочет оценить модель  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \varepsilon_i$ , но, к сожалению, величина  $x_i$  ненаблюдаема. Вместо неё доступна величина  $x_i^*$ . Величина  $x_i^*$  содержит ошибку измерения,  $x_i^* = x_i + a_i$ . Известно, что  $\text{Var}(x_i) = 9$ ,  $\text{Var}(a_i) = 4$ ,  $\text{Var}(\varepsilon_i) = 1$ . Величины  $x_i$ ,  $a_i$  и  $\varepsilon_i$  независимы. Наблюдения представляют собой случайную выборку.

Агнесса оценивает регрессию  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i^*$  с помощью МНК.

- а) Найдите  $\text{plim } \hat{\beta}_2$ .
- б) Являются ли оценки, получаемые Агнессой, состоятельными?

**12.7** Эконометресса Анжелла хочет оценить модель  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 w_i + \varepsilon_i$ , но, к сожалению, величина  $w_i$  ненаблюдаема. Известно, что  $\text{Var}(x_i) = 9$ ,  $\text{Var}(w_i) = 4$ ,  $\text{Var}(\varepsilon_i) = 1$  и  $\text{Cov}(x_i, w_i) = -2$ . Случайная составляющая не коррелирована с регрессорами. Наблюдения представляют собой случайную выборку.

За неимением  $w_i$  Анжелла оценивает регрессию  $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i$  с помощью МНК.

- а) Найдите  $\text{plim } \hat{\beta}_2$ .
- б) Являются ли оценки, получаемые Анжеллой, состоятельными?

**12.8** Эконометресса Венера оценивает регрессию

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i.$$

А на самом деле  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i^3 + u_i$ , причём  $x_i \sim \mathcal{N}(0; 1)$  и ошибки  $u_i | x_i \sim \mathcal{N}(0; \sigma^2)$ . Все остальные предпосылки теоремы Гаусса-Маркова выполнены.

- а) Будут ли оценки  $\hat{\beta}_1$  и  $\hat{\beta}_2$ , получаемые Венерой, состоятельными?
- б) В чём состоит трудность проверки несмещённости оценок?
- в) Будут ли состоятельны оценки МНК, если в качестве инструмента Венера возьмёт  $z_i = \sin x_i$ ? А  $z_i = \cos x_i$ ?
- г) Как изменятся ответы на предыдущие пункты, если истина имеет вид  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i^2 + w_i$ ?

**12.9** Вектора  $(x_1, u_1), (x_2, u_2), \dots$  независимы и одинаково распределены. Также известно, что  $x_i \sim \mathcal{N}(10; 9)$  и  $\mathbb{E}(u_i | x_i) = 0$ .

Найдите  $\text{plim } \left(\frac{1}{n} x' x\right)^{-1}$ ,  $\text{plim } \frac{1}{n} x' u$  и  $\text{plim } (x' x)^{-1} x' u$

**12.10** Возможно ли, что  $\mathbb{E}(x_i | u_i) = 0$  и  $\mathbb{E}(u_i | x_i) = 0$ , но при этом  $x_i$  и  $u_i$  зависимы?

- 12.11** В некотором институте на некотором факультете задумали провести эксперимент: раздать студентам учебники разных цветов случайным образом и посмотреть на итоговую успеваемость по эконометрике. Учебники есть двух цветов: зелёные и красные. Поэтому модель имеет вид:

$$y_i = \beta_1 + \beta_2 \text{green}_i + u_i$$

Здесь  $y_i$  — результат по эконометрике,  $\text{green}_i$  — дамми-переменная на зелёный учебник и  $u_i$  — прочие характеристики студента. Зелёные и красные учебники планировалось раздавать равновероятно. Однако библиотекарь всё прошляпил и разрешил студентам самим выбирать учебник, какой понравится. В результате вместо переменной  $\text{green}_i$  получилась переменная  $\text{green}_i^*$ . Известно, что  $\mathbb{E}(\text{green}_i^*) = \alpha$  и  $\text{Cov}(\text{green}_i^*, u_i) = \gamma$ .

Де-факто оценивалась модель

$$\hat{y}_i = \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 \text{green}_i^*$$

- Найдите  $\text{plim } \hat{\theta}_1, \text{plim } \hat{\theta}_2$ .
- Найдите  $\mathbb{E} \hat{\theta}_1, \mathbb{E} \hat{\theta}_2$ .

- 12.12** Если возможно, придумайте такие случайные величины  $x_1, x_2, u_1$ , что  $x_1$  и  $x_2$  независимы и одинаково распределены, и при этом выполнены условия:

- $\mathbb{E}(u_1 | x_1) = 0$ , но  $\mathbb{E}(u_1 | x_1, x_2) \neq 0$ ;
- $\mathbb{E}(u_1 | x_1) \neq 0$ , но  $\mathbb{E}(u_1 | x_1, x_2) = 0$ .

- 12.13** Рассмотрим классическую парную регрессию со стохастическим регрессором. Всего три наблюдения:

$y_1$	$x_1$
$y_2$	$x_2$
$y_3$	$x_3$

- Соедините линиями независимые случайные величины.
- Соедините линиями одинаково распределённые случайные величины.

## 13 Системы уравнений

Прочитать про системы уравнений можно, например, в [Pie]<sup>2</sup>.

- 13.1** Наблюдения представляют собой случайную выборку и удовлетворяют системе:

$$\begin{cases} q_t = \alpha p_t + u_{t1} \\ q_t = \beta p_t + u_{t2} \end{cases},$$

Ковариационная матрица вектора  $u_t$  пропорциональна единичной.

- Наивный Иван оценивает первое уравнение с помощью МНК. Какую оценку  $\hat{\alpha}$  он получит при больших  $n$ ?
- На секунду предположим, что Ивану наблюдал бы также значения ошибки  $u_{t2}$ . Смог бы в этой ситуации Иван получить состоятельные оценки  $\alpha$  и  $\beta$ ?

- 13.2** Наблюдения представляют собой случайную выборку. Зависимые переменные  $y_{t1}$  и  $y_{t2}$  находятся из системы:

$$\begin{cases} y_{t1} = \beta_{11}x_t + \varepsilon_{t1} \\ y_{t2} = \beta_{21}z_t + \beta_{21}y_{t1} + \varepsilon_{t2} \end{cases},$$

<sup>2</sup>В этих заметках написано что-то странное про неидентифицируемость тождеств. А в целом заметки шикарные.



где вектор ошибок  $\varepsilon_t$  имеет совместное нормальное распределение

$$\varepsilon_t \sim \mathcal{N} \left( \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{pmatrix} \right)$$

Переменные  $x_t$  и  $z_t$  — экзогенные.

Эконометресса Анжела оценивает с помощью МНК первое уравнение, а эконометресса Эвридика — второе.

- а) Найдите пределы по вероятности получаемых ими оценок.
- б) Будут ли оценки состоятельными?

### 13.3 Экзамен 2018-2019. Рассмотрим систему одновременных уравнений

$$\begin{cases} y_1 = \gamma_1 y_2 + \beta_{11} x_1 + \beta_{12} x_2 + \beta_{13} x_3 + u_1 \\ y_2 = \gamma_2 y_1 + \beta_{21} x_1 + \beta_{22} x_2 + \beta_{23} x_3 + u_2 \end{cases}.$$

Здесь  $y_j$  — эндогенные переменные, а  $x_j$  — экзогенные. Наблюдения представляют собой случайную выборку. С помощью условий ранга и порядка проверьте идентифицируемость системы

- а) в общем случае;
- б) при наложении дополнительных ограничений  $\gamma_1 - \gamma_2 = \beta_{23} = 0$ .

### 13.4 Экзамен 2018-2019. Рассмотрим систему одновременных уравнений

$$\begin{cases} y_{1t} = \gamma_{10} + \beta_{12} y_{2t} + \beta_{13} y_{3t} + \gamma_{11} x_{1t} + \gamma_{12} x_{2t} + \varepsilon_{1t} \\ y_{2t} = \gamma_{20} + \beta_{21} y_{1t} + \gamma_{21} x_{1t} + \varepsilon_{2t} \\ y_{3t} = \gamma_{30} + \beta_{31} y_{1t} + \beta_{32} y_{2t} + \gamma_{31} x_{1t} + \gamma_{33} x_{3t} + \varepsilon_{3t} \end{cases}$$

Наблюдения представляют собой случайную выборку. Переменные  $y_i$  — эндогенные, переменные  $x_i$  — экзогенные.

- а) Идентифицируемо ли каждое из уравнений системы?
- б) К чему приведёт применение к первому уравнению двухшагового метода наименьших квадратов?

### 13.5 У Вовочки имеется выборка в 100 наблюдений. Вовочка применяет двухшаговый МНК к первому уравнению системы одновременных уравнений.

- а) Что произойдёт, если для первого уравнения не выполнено условие порядка?
- б) Что произойдёт, если для первого уравнения выполнено условие порядка, но не выполнено условие ранга?
- в) Что произойдёт, если для первого уравнения выполнены условие порядка и условие ранга?

## 14 GMM

Прочсть про обобщённый метод моментов можно, например, [Zso10].

### 14.1 Исследователь Максимилиан оценивает параметр $\theta$ с помощью двух моментных условий, $\mathbb{E}(y_i) = 2\theta$ и $\mathbb{E}(1/y_i) = \theta$ . С трудом Максимилиан нашёл 200 наблюдений и оказалось, что $\sum 1/y_i = 1.5$ . Сначала Максимилиан оценил $\theta$ с помощью простого метода моментов и первого моментного условия, получил $\hat{\theta} = 1$ .

Затем Максимилиан решил применить обобщённый метод моментов, чтобы учесть оба момента. В процессе получения GMM оценки Максимилиан обнаружил, что  $\text{Cov}(y_i, 1/y_i) = -\theta^2$ ,  $\text{Var}(1/y_i) = 9\theta^2$ ,  $\mathbb{E}(y_i^2) = 20\theta^2$ .



- а) Найдите ковариационную матрицу моментных условий,  $\text{Var}(g)$ ;
- б) Найдите оптимальную теоретическую матрицу весов  $W$ ;
- в) Оцените матрицу весов  $\hat{W}$ ;
- г) Найдите оценку GMM с использованием найденной оценки матрицы весов;

**14.2** Величины  $X_i$  равномерны на отрезке  $[-a; 3a]$  и независимы. Есть несколько наблюдений,  $X_1 = 0.5$ ,  $X_2 = 0.7$ ,  $X_3 = -0.1$ .

- а) Найдите  $\mathbb{E}(X_i)$  и  $\mathbb{E}(|X_i|)$ .
- б) Постройте оценку метода моментов, используя  $\mathbb{E}(X_i)$ .
- в) Постройте оценку метода моментов, используя  $\mathbb{E}(|X_i|)$ .
- г) Постройте оценку обобщённого метода моментов используя моменты  $\mathbb{E}(X_i)$ ,  $\mathbb{E}(|X_i|)$  и взвешивающую матрицу.

$$W = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- д) Найдите оптимальную теоретическую взвешивающую матрицу для обобщённого метода моментов
- е) Постройте двухшаговую оценку обобщённого метода моментов, начав со взвешивающей матрицы  $W$
- ж) С помощью полученных оценок постройте 95%-ый доверительный интервал для неизвестного параметра  $a$

**14.3** Винни-Пух и Пятачок оценивают неизвестный параметр правильности пчёл  $\theta$ . Когда Винни-Пух проводит очередное измерение параметра правильности, он получает значение  $X_i$  нормально распределенное вокруг неизвестного параметра,  $X_i \sim \mathcal{N}(\theta, 1)$ . Когда Пятачок проводит измерение параметра правильности, он получает значение  $Y_i$ , также нормально распределенное вокруг  $\theta$ , но имеющее большую дисперсию,  $Y_i \sim \mathcal{N}(\theta, 4)$ . Различные измерения независимы между собой.

- а) Найдите  $\mathbb{E}(X_i)$  и постройте соответствующую оценку метода моментов.
- б) Найдите  $\mathbb{E}(Y_i)$  и постройте соответствующую оценку метода моментов.
- в) Используя два указанных момента найдите обобщённую оценку метода моментов для взвешивающей матрицы

$$W = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 9 \end{pmatrix}.$$

- г) Найдите оптимальную взвешивающую матрицу  $W$ .

**14.4** Начинаящий футболист делает независимые удары по воротам. С вероятностью  $\theta$  он попадает левее ворот, с вероятностью  $2\theta$  — правее ворот и попадает с вероятностью  $1 - 3\theta$ . Из  $n$  ударов он попал  $N_L$  раз левее ворот и  $N_R$  раз — правее.

- а) Найдите  $\mathbb{E}(N_L)$  и постройте соответствующую оценку  $\theta$  методом моментов.
- б) Найдите  $\mathbb{E}(N_R)$  и постройте соответствующую оценку  $\theta$  методом моментов.
- в) Используя два указанных момента постройте оценку обобщённого метода моментов со взвешивающей матрицей

$$W = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 9 \end{pmatrix}.$$

- г) Найдите оптимальную теоретическую взвешивающую матрицу.
- д) Для каждой из найденных оценок постройте 95%-ый доверительный интервал, если  $N_L = 10$ ,  $N_R = 30$ ,  $n = 200$ .

**14.5** Можно ли получить МНК-оценки в классической задаче регрессии как оценки обобщённого метода моментов? Можно ли получить оценки метода максимального правдоподобия как оценки обобщённого метода моментов?

**14.6** Равшан и Джамшут измеряют длину  $\theta$  оставшегося куска рулона обоев много раз. Измерения Равшана,  $X_i$ , распределены нормально,  $\mathcal{N}(2\theta, \theta^2 + 100)$ . Измерения Джамшута,  $Y_i$ , также распределены нормально  $\mathcal{N}(\theta, \theta^2 + 10)$ . Поскольку Равшан и Джамшут спорят друг с другом, их измерения зависимы,  $\text{Cov}(X_i, Y_i) = -1$ .

Оказалось, что по 200 (?проверить?) измерениям  $\sum X_i = 300$ ,  $\sum Y_i = 100$ .

Насяльника хочет измерить параметр  $\theta$ .

а) Запишите два моментных условия на  $\mathbb{E}(X_i)$  и  $\mathbb{E}(Y_i)$  в виде

$$\begin{cases} \mathbb{E}(g_1(X_i, \theta)) = 0 \\ \mathbb{E}(g_2(Y_i, \theta)) = 0 \end{cases}$$

б) Найдите ковариационную матрицу  $\text{Var}(g)$  и теоретическую оптимальную матрицу весов  $W$  для обобщённого метода моментов;

в) Найдите оценку параметра  $\theta$  методом моментов с единичной матрицей весов;

г) Найдите оценку параметра  $\theta$  методом моментов, предварительно оценив оптимальную матрицу с помощью  $\hat{\theta}$  из предыдущего пункта;

## 15 Панельки

Хорошо изложена теория у Kurt Schmidheiny, <https://www.schmidheiny.name/teaching/shortguides.htm>.

**15.1** Рассмотрим FE-модель  $y_{it} = \alpha + \beta x_{it} + \gamma z_i + c_i + u_{it}$ .

Есть всего два момента времени,  $t = 1$  и  $t = 2$ . Визина использует within-оценку  $\hat{\beta}_W$ , а Федя — оценку в первых разностях,  $\hat{\beta}_{FD}$ .

а) Как связаны между собой оценки  $\hat{\beta}_W$  и  $\hat{\beta}_{FD}$ ?

б) Как связаны между собой  $RSS_W$  и  $RSS_{FD}$ ?

в) Являются ли оценки  $\hat{\beta}_W$  и  $\hat{\beta}_{FD}$  состоятельными?

г) Как построить 95%-ый доверительный интервал с помощью  $\hat{\beta}_{FD}$  и  $\hat{\beta}_W$  для  $\beta$ ?

**15.2** У храброй исследовательницы Аграфены были панельные данные за три периода,  $t = 1, t = 2, t = 3$ . По старинке для хранения данных Аграфена распечатала все данные на листочках. Резвый кот Борис безнадежно испортил листок, относившийся к  $t = 2$ . И тогда Аграфена решила восстановить данные потерянного периода  $t = 2$  с помощью линейной аппроксимации,  $x_{i2} = (x_{i1} + x_{i3})/2$ ,  $y_{i2} = (y_{i1} + y_{i3})/2$ .

Успешно восстановив испорченные игривым котом Борисом данные, Аграфена приступила к анализу FE-модели

$$y_{it} = \alpha + \beta x_{it} + \gamma z_i + c_i + u_{it}.$$

Аграфена оценила коэффициент  $\beta$  с помощью within-оценки  $\hat{\beta}_W$  и оценки в первых разностях,  $\hat{\beta}_{FD}$ .

а) Как связаны между собой оценки  $\hat{\beta}_W$  и  $\hat{\beta}_{FD}$ ?

б) Как связаны между собой  $RSS_W$  и  $RSS_{FD}$ ?

**15.3** Рассмотрим модель  $y_{it} = \alpha_i + \beta x_{it} + c_i + u_{it}$ , оцениваемую по нескольким точкам:

а) Нарисуйте линию сквозной регрессии (pooled ols).

б) Нарисуйте данные в осях первых разностей и нарисуйте линию регрессии в первых разностях.

в) Нарисуйте данные в осях отклонений от среднего и нарисуйте линию within-регрессии.

## 16 Решения

### 1.1.

а)  $\hat{\beta} = 13/9$ ;

б)

в)  $\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$ ;

г)  $\hat{\beta}_1 = -1, \hat{\beta}_2 = 2$ ;

д)

е)  $\hat{\beta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ .

### 1.2.

а) верная формула;

б) верная формула;

в) верная формула;

г) неверная формула, верная имеет вид  $\sum_{i,j} (x_i - x_j)(y_i - y_j) = 2n \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ ;

д) неверная формула, верная имеет вид  $\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_i x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}$ .

### 1.3.

а) 0

б) 0

в) 0

г)  $\sum x_i^2$

### 1.4.

а)  $\hat{\theta} = \frac{\sum y_i(1+x_i)}{\sum (1+x_i)^2}$

б)  $\hat{\theta} = \frac{\sum (y_i-1)x_i}{\sum x_i^2}$

в)  $\hat{\theta} = \frac{\sum (y_i/x_i)}{\sum (1/x_i^2)}$

г)  $\hat{\theta} = \sum ((y_i - z_i)(x_i - z_i)) / \sum (x_i - z_i)^2$

**1.5.**  $\hat{\alpha} = 0, \hat{\beta} = 1$

**1.6.** Рассмотрим регрессию суммы  $(y_i + z_i)$  на саму себя. Естественно, в ней

$$\widehat{y_i + z_i} = 0 + 1 \cdot (y_i + z_i).$$

Отсюда получаем, что  $\hat{\alpha} + \hat{\gamma} = 0$  и  $\hat{\beta} + \hat{\delta} = 1$ .

**1.7.**

Исходя из условия, нужно оценить методом МНК коэффициенты двух следующих моделей:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i$$

$$y_i = \frac{\gamma}{2} + \frac{\delta}{2} x_i + \frac{1}{2} v_i$$

Заметим, что на минимизацию суммы квадратов остатков коэффициент  $1/2$  не влияет, следовательно:

$$\hat{\gamma} = 2\hat{\alpha}, \hat{\delta} = 2\hat{\beta}$$

**1.8.** Выпишем задачу:

$$\begin{cases} RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_1 x_i - \hat{\beta}_2 z_i)^2 \rightarrow \min_{\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2} \\ \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 = 1 \end{cases}$$

Можем превратить ее в задачу минимизации функции одного аргумента:

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - x_i - \hat{\beta}_2(z_i - x_i))^2 \rightarrow \min_{\hat{\beta}_2}$$

Выпишем условия первого порядка:

$$\frac{\partial RSS}{\partial \hat{\beta}_2} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - x_i - \hat{\beta}_2(z_i - x_i))(x_i - z_i) = 0$$

Отсюда:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)(x_i - z_i) + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n (z_i - x_i)^2 = 0 \Rightarrow \hat{\beta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)(z_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n (z_i - x_i)^2}$$

А  $\hat{\beta}_1$  найдется из соотношения  $\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 = 1$ .

**1.9.** Обозначив вес первого слитка за  $\beta_1$ , вес второго слитка за  $\beta_2$ , а показания весов за  $y_i$ , получим, что

$$y_1 = \beta_1 + \varepsilon_1, y_2 = \beta_2 + \varepsilon_2, y_3 = \beta_1 + \beta_2 + \varepsilon_3$$

Тогда

$$(300 - \beta_1)^2 + (200 - \beta_2)^2 + (400 - \beta_1 - \beta_2)^2 \rightarrow \min_{\beta_1, \beta_2}$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{800}{3}, \hat{\beta}_2 = \frac{500}{3}$$

**1.10.** Можем воспользоваться готовой формулой для регрессии на константу:

$$\hat{\beta} = \bar{y} = \frac{10 + 10 + 3}{3} = \frac{23}{3}$$

(можно решить задачу  $2(10 - \beta)^2 + (3 - \beta)^2 \rightarrow \min$ )

**1.11.**

- а) Да.
- б) Да.
- в) Да.
- г) Нет. Из условия первого порядка для первой выборки следует, что  $\sum_A y_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 \sum x_i$ . Значит  $\sum_A y_i > 0$ . Аналогично,  $\sum_B y_i > 0$ , но  $\sum y_i < 0$ .

**1.12.**

**1.13.** Поскольку значения  $y$  остались теми же,  $TSS_1 = TSS_2$ .

Добавление ещё одного регрессора не уменьшит точность оценки, то есть  $RSS_2 \leq RSS_1$ ,  $ESS_2 \geq ESS_1$ .

Тогда и коэффициент детерминации  $R^2 = ESS/TSS$  не уменьшится, то есть  $R_2^2 \geq R_1^2$ .

**1.14.** Пусть  $\bar{y}$  — средний  $y$  до добавления нового наблюдения,  $\bar{y}'$  — после добавления нового наблюдения. Будем считать, что изначально было  $n$  наблюдений. Заметим, что

$$\bar{y}' = \frac{(y_1 + \dots + y_n) + y_{n+1}}{n+1} = \frac{n\bar{y} + y_{n+1}}{n+1} = \frac{n}{n+1}\bar{y} + \frac{1}{n+1}y_{n+1}$$

Покажем, что  $TSS$  может только увеличиться при добавлении нового наблюдения (остаётся неизменным при  $y_{n+1} = \bar{y}$ ):

$$\begin{aligned} TSS' &= \sum_{i=1}^{n+1} (y_i - \bar{y}')^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y} + \bar{y} - \bar{y}')^2 + (y_{n+1} - \bar{y}')^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + n(\bar{y} - \bar{y}')^2 + (y_{n+1} - \bar{y}')^2 = TSS + \frac{n}{n+1}(y_{n+1} - \bar{y})^2 \end{aligned}$$

Следовательно,  $TSS' \geq TSS$ .

Также сумма  $RSS$  может только вырасти или остаться постоянной при добавлении нового наблюдения. Действительно, новое  $(n+1)$ -ое слагаемое в сумме неотрицательно. А сумма  $n$  слагаемых минимальна при старых коэффициентах, а не при новых.

$ESS$  и  $R^2$  могут меняться в обе стороны. Например, рассмотрим ситуацию, где точки лежат симметрично относительно некоторой горизонтальной прямой. При этом  $ESS = 0$ . Добавим наблюдение —  $ESS$  вырастет, удалим наблюдение —  $ESS$  вырастет.

**1.15.**

- а)  $R^2$  упал до нуля.
- б) Да, можно. Если добавить точку далеко слева внизу от исходного набора данных, то наклон линии регрессии будет положительный. Если далеко справа внизу, то отрицательный. Будем двигать точку так, чтобы поймать нулевой наклон прямой. Получим  $ESS = 0$ .

**1.16.** На две неизвестных  $a$  и  $b$  нужно два уравнения. Эти два уравнения — ортогональность вектора остатков плоскости регрессоров. А именно:

$$\begin{cases} \sum_i (y_i - \hat{y}_i) = 0 \\ \sum_i (y_i - \hat{y}_i) \hat{y}_i = 0 \end{cases}$$

В нашем случае

$$\begin{cases} -1 + (6 - a) + (6 - b) = 0 \\ -1 + (6 - a)a + (6 - b)b = 0 \end{cases}$$

Решаем квадратное уравнение и получаем два решения:  $a = 4$  и  $a = 7$ . Итого:  $a = 4, b = 7$ .

**1.17.** Обе ситуации возможны.

**1.18.**

- а) нет, да
- б) нет, нет
- в) да, да, нет, нет

**1.19.** Заменяем факторную переменную на набор бинарных предикторов. С помощью этих предикторов прогнозируем бинарную или количественную переменную. Считаем  $R^2$ . Извлекаем корень.

**1.20.** График примерно симметричен относительно  $x = y$ . Линии регрессий примерно равны  $\hat{y}_i \approx 0.5x_i$  и  $\hat{x}_i \approx 0.5y_i$ , что при выражении в обычных координатах даёт  $y_i \approx 2\hat{x}_i$ .

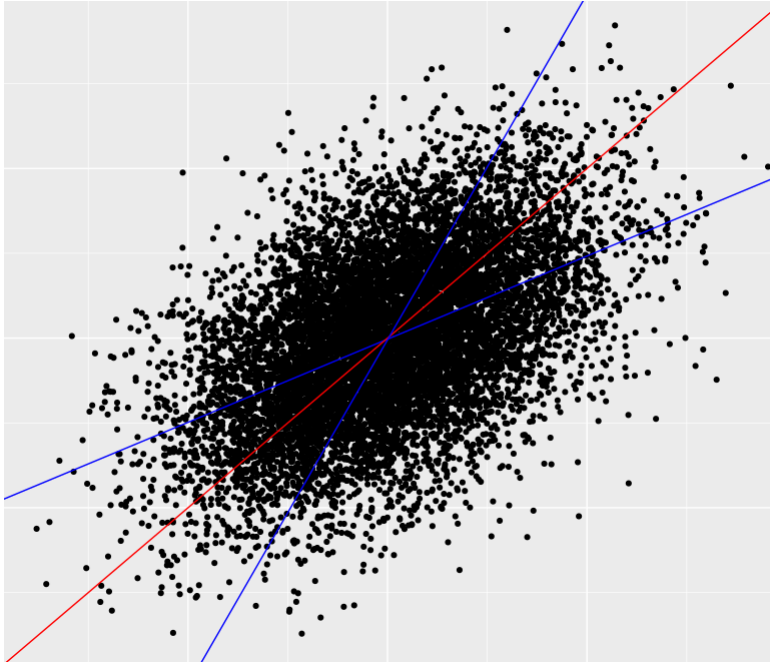
```
library(mvtnorm)
library(tidyverse)
```

```
V = matrix(c(1, 0.5, 0.5, 1), nrow = 2)
xy = rmvnorm(n = 10^4, mean = c(0, 0), sigma = V)
colnames(xy) = c('x', 'y')
xy_df = as_tibble(xy)
```

```
mod_yx = lm(data = xy_df, y ~ x)
```

```
mod_xy = lm(data = xy_df, x ~ y)
xy_slope = 1 / coef(mod_xy)[2]
xy_int = - coef(mod_xy)[1] / coef(mod_xy)[2]
```

```
qplot(data = xy_df, x = x, y = y) +
  geom_abline(slope = coef(mod_yx)[2], intercept = coef(mod_yx)[1], color = 'red') +
  geom_abline(slope = 1, intercept = 0, color = 'red') +
  geom_abline(slope = xy_slope, intercept = xy_int, color = 'blue')
```



1.21.

1.22.

- а)  $\hat{\beta}_2 = \sum_{ij} w_{ij} \hat{\beta}_{2ij}$ , где веса считаются по формуле  $w_{ij} = q_{ij} / \sum_{ij} q_{ij}$ .  
 б)  $\hat{\beta}_1 = \sum_{ij} w_{ij} \hat{\beta}_{1ij}$ .

2.1.

- а)  $f'(x) = 2x + 3, df = 2x dx + 3dx, df = 1.3$   
 б)  $df = 2x_1 dx_1 + 3dx_1 \cdot x_2^3 + 3x_1 \cdot 3x_2^2 dx_2, df = 1.7$

2.2.

- а)  $A(dR)B$   
 б)  $2r' dr$   
 в)  $r'(A' + A)dr$   
 г)  $-R^{-1} \cdot dR \cdot R^{-1}$   
 д)  $-\sin(r'r) \cdot 2r' dr$   
 е)  $\frac{r'(A'+A)dr \cdot r'r - r'Ar2r'dr}{(r'r)^2}$

2.3.

- а)  $dQ(\hat{\beta}) = 2(y - X\hat{\beta})^T (-X) d\hat{\beta}, d^2Q(\hat{\beta}) = 2d\hat{\beta}^T X^T X d\hat{\beta}$   
 б)  $dQ(\hat{\beta}) = 0$   
 в)  $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$

### 2.4.

- а)  $dQ(\hat{\beta}) = -2(y - X\hat{\beta})^T X d\hat{\beta} + 2\lambda\hat{\beta}^T d\hat{\beta}$ ,  $d^2Q(\hat{\beta}) = 2d\hat{\beta}^T (X^T X + \lambda I) d\hat{\beta}$   
 б)  $dQ(\hat{\beta}) = 0$   
 в)  $\hat{\beta} = (X^T X + \lambda I)^{-1} X^T y$

### 2.5.

- а)  $\hat{\mu} = \sum y_i / n$   
 б)  
 в)

### 3.1.

$$\begin{cases} \hat{\beta}_1 \sum z_i^2 + \hat{\beta}_2 \sum x_i z_i = \sum z_i y_i \\ \hat{\beta}_1 \sum x_i z_i + \hat{\beta}_2 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \end{cases}$$

$$\begin{cases} \hat{\beta}_1 n + \hat{\beta}_2 \sum x_i = \sum y_i \\ \hat{\beta}_1 \sum x_i + \hat{\beta}_2 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \end{cases}$$

$$X' X \hat{\beta} = X' y$$

### 3.2.

- а)  $n = 5$   
 б)  $k = 3$   
 в)  $TSS = 10$   
 г)  $\hat{\beta} = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \end{pmatrix} = (X' X)^{-1} X' y = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$   
 д)  $\hat{y} = X \hat{\beta}$   
 е)  $RSS = 2$   
 ж)  $R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = 0.8$ .  $R^2$  высокий, построенная эконометрическая модель хорошо описывает данные

**3.3.**  $\sum y_i^2 = \sum \hat{y}_i^2 + \sum \hat{\varepsilon}_i^2$ ,  $TSS = ESS + RSS$ ,

**3.4.**  $s\text{Corr}(\hat{y}, y) = \frac{s\text{Cov}(\hat{y}, y)}{\sqrt{s\text{Var}(\hat{y}) s\text{Var}(y)}}$

$s\text{Corr}(\hat{y}, y)^2 = \frac{(s\text{Cov}(\hat{y}, y))^2}{s\text{Var}(\hat{y}) s\text{Var}(y)}$

$R^2 \cdot TSS / (n - 1) \cdot ESS / (n - 1) = (s\text{Cov}(\hat{y}, y))^2 = (s\text{Cov}(\hat{y} - \bar{y}, y - \bar{y}))^2$  Отсюда можно понять, что ковариация для двухмерного случая равна произведению длин векторов  $\hat{y} - \bar{y}$  и  $y - \bar{y} - \sqrt{ESS}$  и  $\sqrt{TSS}$  на косинус угла между ними ( $\sqrt{R^2}$ ). Геометрически скалярное произведение можно изобразить как произведение длин одного из векторов на проекцию второго вектора на первый. Если будет проецировать  $y - \bar{y}$  на  $\hat{y} - \bar{y}$ , то получим как раз  $ESS$  — тот квадрат на рисунке, что уже построен.

$s\text{Cov}(\hat{y}, y) = \sqrt{ESS^2 / (n - 1)^2} = ESS / (n - 1)$



**3.5.** Спроецируем единичный столбец на «плоскость», обозначим его  $1'$ . Делаем проекцию  $y$  на «плоскость» и на  $1'$ . Далее аналогично.

**3.6.** Проекция  $y$  на  $\hat{y}$  это  $\hat{y}$ , поэтому оценки коэффициентов будут 0 и 1. Оценка дисперсии  $\frac{RSS}{(n-2)ESS}$ . Нарушены предпосылки теоремы Гаусса-Маркова, например, ошибки новой модели в сумме дают 0, значит коррелированы.

**3.7.** Либо в регрессию включена константа, либо единичный столбец (тут была опечатка, столбей) можно получить как линейную комбинацию регрессоров, например, включены дамми-переменные для каждого возможного значения качественной переменной.

**3.8.** Для удобства центрируем мысленно все переменные. Это не меняет ни корреляций, ни выборочных дисперсий, ни угловых коэффициентов в регрессиях. В регрессиях при этом оценка коэффициента при константе превращается в ноль, но какое нам до неё дело? :) Зато при нулевом среднем выборочные корреляции превратились в косинус угла между векторами:

$$\text{sCorr}(x, y) = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}} = \cos(x, y)$$

И при нулевом среднем выборочная дисперсия — это длина вектора с точностью до умножения на  $(n-1)$ :

$$\text{sVar}(x) = \frac{\sum x_i^2}{n-1} = \frac{\|x\|^2}{n-1}$$

Начать можно с геометрического смысла оценок МНК:

$$\begin{cases} 1.4 = \frac{\|y\|}{\|x\|} \cos(x, y) \\ 0.6 = \frac{\|x\|}{\|y\|} \cos(x, y) \end{cases}$$

Отсюда находим  $\|y\|/\|x\| = \hat{\sigma}_y/\hat{\sigma}_x$  и  $\cos(x, y) = \text{sCorr}(x, y)$

Дальше можно решить по теореме косинусов.

$$\text{а) } \text{sCorr}(x, y) = \sqrt{0.84}, \text{sCorr}(y, z) = \frac{\sqrt{70}}{10}, \text{sCorr}(x, z) = -\frac{\sqrt{30}}{10}$$

$$\text{б) } \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2} = \frac{3}{7}, \frac{\hat{\sigma}_z^2}{\hat{\sigma}_y^2} = \frac{8}{35}, \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_z^2} = \frac{15}{8}$$

**3.9.** все :)

**4.1.**  $\dim V = 1, \dim W = 2, \dim V \cap W = 0, \dim V^\perp = 2, \dim W^\perp = 1$ . Эти же числа и будут степенями свободы хи-квадрат распределения.

$$\text{4.2. } \dim V = 1, \dim W = n-1, \dim V \cap W = 0, \dim V^\perp = n-1, \dim W^\perp = 1.$$

**4.3.**

**4.4.**

**4.5.** Сферы с центром в начале координат. Проекция имеет хи-квадрат распределение с тремя степенями свободы. Для нахождения максимальной вероятности максимизируем функцию

$$\exp(-R^2/2) \cdot ((R+t)^3 - R^3) \rightarrow \max_R$$

, где  $R$  — радиус мякоти, а  $t$  — толщина кожуры апельсина. Оставляем только линейную часть по  $t$  и затем максимизируем.

Наибольшая вероятность попасть в апельсин радиуса  $R = 1$ .

5.1.

5.2.

5.3.

а)  $\text{Var}(\varepsilon_1) = \text{Var}(\varepsilon)_{(1,1)} = 4 \cdot I_{(1,1)} = 4$

б)  $\text{Var}(\beta_1) = 0$ , так как  $\beta_1$  — детерминированная величина.

в)  $\text{Var}(\hat{\beta}_1) = \sigma^2(X'X)_{(1,1)}^{-1} = 0.5\sigma^2 = 0.5 \cdot 4 = 2$

г)  $\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_1) = \hat{\sigma}^2(X'X)_{(1,1)}^{-1} = 0.5\hat{\sigma}_{(1,1)}^2 = 0.5\frac{RSS}{5-3} = 0.25RSS = 0.25y'(I - X(X'X)^{-1}X')y = 0.25 \cdot 1 = 0.25$   
 $\hat{\sigma}^2 = \frac{RSS}{n-k} = \frac{1}{2}.$

д) Так как оценки МНК являются несмещёнными, то  $\mathbb{E}(\hat{\beta}) = \beta$ , значит:

$$\mathbb{E}(\hat{\beta}_1) - \beta_1^2 = \mathbb{E}(\hat{\beta}_1) - (\mathbb{E}(\hat{\beta}_1))^2 = \widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_1) = 0.25$$

е)  $\text{Cov}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = \sigma^2(X'X)_{(2,3)}^{-1} = 4 \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) = -2$

ж)  $\widehat{\text{Cov}}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = \widehat{\text{Var}}(\hat{\beta})_{(2,3)} = \hat{\sigma}^2(X'X)_{(2,3)}^{-1} = \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{4}$

з)  $\text{Var}(\hat{\beta}_2 - \hat{\beta}_3) = \text{Var}(\hat{\beta}_2) + \text{Var}(\hat{\beta}_3) + 2\text{Cov}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = \sigma^2((X'X)_{(2,2)}^{-1} + (X'X)_{(3,3)}^{-1} + 2(X'X)_{(2,3)}^{-1}) = 4(1 + 1.5 + 2 \cdot (-0.5)) = 6$

и)  $\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_2 - \hat{\beta}_3) = \widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_2) + \widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_3) + 2\widehat{\text{Cov}}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = \hat{\sigma}^2((X'X)_{(2,2)}^{-1} + (X'X)_{(3,3)}^{-1} + 2(X'X)_{(2,3)}^{-1}) = \frac{1}{2} \cdot 1.5 = 0.75$

к)  $\text{Var}(\beta_2 - \beta_3) = 0$

л)  $\text{Corr}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = \frac{\text{Cov}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)}{\sqrt{\text{Var}(\hat{\beta}_2)\text{Var}(\hat{\beta}_3)}} = \frac{-2}{\sqrt{4 \cdot 6}} = -\frac{\sqrt{6}}{6}$

м)  $\widehat{\text{Corr}}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = \frac{\widehat{\text{Cov}}(\hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)}{\sqrt{\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_2)\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_3)}} = \frac{-\frac{1}{4}}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}}} = -\frac{\sqrt{6}}{6}$

н)  $(n-k)\frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} \sim \chi_{n-k}^2.$

$$\mathbb{E}\left((n-k)\frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2}\right) = n-k$$

$$\mathbb{E}\left(\frac{\hat{\sigma}^2}{2}\right) = 1$$

$$\mathbb{E}(\hat{\sigma}^2) = 2$$

о)  $\hat{\sigma}^2 = \frac{RSS}{n-k} = \frac{1}{2}$

**5.4.** На 40 наблюдений 15 переменных — это явная переопределенность. Асимптотических свойств МНК мы явно не можем использовать. Априори разумно предполагать гетероскедастичность, с которой на 40 наблюдениях никак не поборешься. Для использования робастных стандартных ошибок слишком мало наблюдений. Цель Аполлона слишком размыта. Правильнее было уточнить: построить модель, чтобы прогнозировать, или построить модель, чтобы проверить, влияет ли регрессор  $z$  на зависимую переменную.

Вероятно, самое разумное, это применить LASSO выбрав параметр регуляризации так, чтобы осталось буквально два-три регрессора.

### 5.5.

а)  $\hat{\beta}_{ols} = (y_1 + 2y_2)/5;$

б)  $\text{Var}(\hat{\beta}_{ols} | x) = 1/5;$

в) Заметим, что по величине  $2y_1 - y_2$  можно однозначно восстановить величины ошибок  $u_1$  и  $u_2$ . Например, если  $2y_1 - y_2 = 3$ , то  $u_1 = 1, u_2 = -1$ .

$$\hat{\beta}_{best} = \begin{cases} y_1 + 1, & \text{если } 2y_1 - y_2 < 0, \\ y_1 - 1, & \text{если } 2y_1 - y_2 > 0. \end{cases}$$

г) Шок контент,  $\text{Var}(\hat{\beta}_{best} | x) = 0.$

д) Построенная оценка  $\hat{\beta}_{best}$  является нелинейной по  $y$ , а теорема Гаусса — Маркова гарантирует только, что метод наименьших квадратов порождает несмещённую оценку с наименьшей дисперсией среди линейных по  $y$  оценок.

### 6.1.

#### 6.2.

#### 6.3.

#### 6.4.

### 7.1.

а)  $M = \begin{pmatrix} AC + BE & AD + BF \end{pmatrix}$

Предположим, что матрицы  $A$  и  $B$  имеют  $m$  строк. Тогда размерность блока  $AC + BE = m \times p$ ,  $AD + BF = m \times q$ .

б)  $M = \begin{pmatrix} CA + DB \\ EA + FB \end{pmatrix}$

Предположим, что матрицы  $A$  и  $B$  имеют  $n$  столбцов. Тогда размерность блока  $CA + DB = p \times n$ ,  $EA + FB = q \times n$ .

в)  $M = \begin{pmatrix} A^T & C^T \\ B^T & D^T \end{pmatrix}$

Блок  $A^T$  имеет размерность  $p \times q$ ,  $B^T = q \times q$ ,  $C^T = p \times p$ ,  $D^T = q \times p$ .

### 7.2.

а)  $M^{-1} = \begin{pmatrix} A^{-1} & 0 \\ 0 & B^{-1} \end{pmatrix}$

$$\text{б)} M^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & B^{-1} \\ A^{-1} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{в)} M^{-1} = \begin{pmatrix} A^{-1} & -A^{-1}CB^{-1} \\ 0 & B^{-1} \end{pmatrix}$$

$$\text{г)} M^{-1} = \begin{pmatrix} A^{-1} & 0 \\ -B^{-1}CA^{-1} & B^{-1} \end{pmatrix}$$

### 7.3.

а)

$$\begin{aligned} \left( \begin{array}{cc|cc} A & C & I & 0 \\ D & B & 0 & I \end{array} \right) &\sim \left( \begin{array}{cc|cc} I & A^{-1}C & A^{-1} & 0 \\ D & B & 0 & I \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{cc|cc} I & A^{-1}C & A^{-1} & 0 \\ 0 & B - DA^{-1}C & -DA^{-1} & I \end{array} \right) \sim \\ &\left( \begin{array}{cc|cc} I & A^{-1}C & A^{-1} & 0 \\ 0 & I & -(B - DA^{-1}C)^{-1}DA^{-1} & (B - DA^{-1}C)^{-1} \end{array} \right) \sim \\ &\left( \begin{array}{cc|cc} I & 0 & A^{-1} + A^{-1}C(B - DA^{-1}C)^{-1}DA^{-1} & -A^{-1}C(B - DA^{-1}C)^{-1} \\ 0 & I & -(B - DA^{-1}C)^{-1}DA^{-1} & (B - DA^{-1}C)^{-1} \end{array} \right) \end{aligned}$$

То есть  $X = A^{-1} + A^{-1}C(B - DA^{-1}C)^{-1}DA^{-1}$ .

б) Из равенства

$$\begin{pmatrix} A & C \\ D & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X & Z \\ Y & W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}$$

получаем систему:

$$\begin{cases} AX + CY = I \\ DX + BY = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} X = A^{-1}(I - CY) \\ DX + BY = 0 \end{cases}$$

Подставляя первое уравнение во второе, получим:

$$DA^{-1}(I - CY) = -BY \Rightarrow DA^{-1} = (DA^{-1}C - B)Y \Rightarrow I = (C - AD^{-1}B)Y \Rightarrow Y = (C - AD^{-1}B)^{-1}$$

И окончательно из второго уравнения:

$$DX = -B(C - AD^{-1}B)^{-1} \Rightarrow -(C - AD^{-1}B)B^{-1}DX = I \Rightarrow X = (A - CB^{-1}D)^{-1}$$

в)

$$\begin{aligned} (A - CB^{-1}D)(A^{-1} + A^{-1}C(B - DA^{-1}C)^{-1}DA^{-1}) &= \\ I - CB^{-1}DA^{-1} + (C - CB^{-1}DA^{-1}C)(B - DA^{-1}C)^{-1}DA^{-1} &= \\ I - CB^{-1}DA^{-1} + CB^{-1}(B - DA^{-1}C)(B - DA^{-1}C)^{-1}DA^{-1} &= \\ I - CB^{-1}DA^{-1} + CB^{-1}DA^{-1} &= I \end{aligned}$$

### 7.4.

#### 8.1.

$$\mathbb{E}(y_i(1) - y_i(0)) = \mathbb{E}(y_i \mid w_i = 1) - \mathbb{E}(y_i \mid w_i = 0)$$

#### 8.2.

#### 8.3.

а)  $\hat{\mu} = \hat{\alpha}$

б)  $\hat{\delta}_c = \hat{\delta}_d$

в)  $RSS_1 = RSS_2$

г)  $se(\hat{\delta}_c) \neq se(\hat{\delta}_d)$

9.1.

9.2.

а)  $\ell = n \ln \lambda - \lambda \sum y_i$

б)  $\hat{\lambda} = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{1}{2}$

в)  $I(\lambda) = \frac{n}{\lambda^2}$

г)  $LR = 2(n \ln \frac{n}{\sum y_i} - n - n \ln \lambda_R + \lambda_R \sum y_i)$

$$LM = \left( \frac{n}{\lambda} - \sum y_i \right)^2 \frac{\lambda^2}{n}$$

$$W = \left( \frac{\sum y_i}{n} - \lambda_R \right)^2 \frac{n}{\lambda^2}$$

д)  $LR \approx 61.37, LM = W = 100$

е)  $\chi^2_{1,0.95} = 3.84$ , основная гипотеза отвергается.

9.3.

а)  $\ell = n \ln \sqrt{2\pi} - \frac{1}{2} \sum (y_i - \beta x_i)^2$

б)  $\hat{\beta}_{ML} = \frac{\sum y_i x_i}{\sum x_i^2} = 2.5$

в)  $I(\beta) = \sum x_i^2$

г)  $LR = -\sum (y_i - \hat{\beta}_{ML} x_i)^2 + \sum (y_i - \beta_R x_i)^2$

$$LM = \left( \sum (y_i x_i - \beta_R x_i^2) \right)^2 \cdot \frac{1}{\sum x_i^2}$$

$$W = (\hat{\beta}_{ML} - \beta_R)^2 \sum x_i^2$$

д)  $LR = LM = W = 625$

е)  $\chi^2_{1,0.95} = 3.84$ , основная гипотеза отвергается.

9.4.

а)  $\ell = \text{const} + y_1 \ln p_1 + y_2 \ln p_2 + y_3 \ln p_3 + (n - y_1 - y_2 - y_3) \ln(1 - y_1 - y_2 - y_3)$

б)  $\hat{p} = \begin{pmatrix} y_1/n \\ y_2/n \\ y_3/n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.3 \\ 0.2 \end{pmatrix}$

в)  $I(p) = \begin{pmatrix} \frac{n}{p_1} + \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} & \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} & \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} \\ \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} & \frac{n}{p_2} + \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} & \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} \\ \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} & \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} & \frac{n}{p_3} + \frac{n}{1-p_1-p_2-p_3} \end{pmatrix}$

$$\text{г) } I^{-1}(p) = \begin{pmatrix} \frac{p_1(1-p_1)}{n} & -\frac{p_1 p_2}{n} & -\frac{p_1 p_3}{n} \\ -\frac{p_1 p_2}{n} & \frac{p_2(1-p_2)}{n} & -\frac{p_2 p_3}{n} \\ -\frac{p_1 p_3}{n} & -\frac{p_2 p_3}{n} & \frac{p_3(1-p_3)}{n} \end{pmatrix}$$

9.5.

а)  $\hat{\theta}^{UR} = h(y)$

б)  $\theta^R = \begin{pmatrix} \theta_1^0 \\ h_2(y) - C^{-1} B^T (\theta_1^0 - h_1(y)) \end{pmatrix}$

3–6.  $LR = LM = W = (\theta_1^0 - h_1(y))^T (A - BC^{-1} B^T) (\theta_1^0 - h_1(y))$

9.6.

2.  $Q = \frac{1}{\sigma^2} X^T X, h(y) = (X^T X)^{-1} X^T y$

9.7.

9.8.

9.9. Мы знаем, что  $(RSS_R - RSS_{UR}) \cdot (60 - 10) / 5RSS_{UR}$  имеет в точности  $F$ -распределение. Находим критическое значение для него по таблице. Выражаем три статистики через  $F$ -распределение. Получаем точные критические значения.

10.1.

а)  $\hat{\beta}_{OLS} = 11/9$

б)  $se(\hat{\beta}) = \sqrt{5/162}$

в)  $se_{HC0}(\hat{\beta}) = \sqrt{168}/81, se_{HC3}(\hat{\beta}) = \sqrt{2649}/180$

г)  $\hat{\beta} = 7/6$

10.2.  $\text{Var}(\varepsilon_i) = cx_i^4$

10.3. Протестируем гетероскедастичность ошибок при помощи теста Голдфельда-Квандта.  $H_0 : \text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2, H_a : \text{Var}(\varepsilon_i) = f(x_i)$

а) Тестовая статистика  $GQ = \frac{RSS_3/(n_3-k)}{RSS_1/(n_1-k)}$ , где  $n_1 = 11$  — число наблюдений в первой подгруппе,  $n_3 = 11$  — число наблюдений в последней подгруппе,  $k = 3$  — число факторов в модели, считая единичный столбец.

б) Распределение тестовой статистики при верной  $H_0$ :  $GQ \sim F_{n_3-k, n_1-k}$

в) Наблюдаемое значение  $GQ_{obs} = 1.41$

г) Область, в которой  $H_0$  не отвергается:  $GQ \in [0; 3.44]$

д) Статистический вывод: поскольку  $GQ_{obs} \in [0; 3.44]$ , то на основании имеющихся наблюдений на уровне значимости 5% основная гипотеза  $H_0$  не может быть отвергнута. Таким образом, тест Голдфельда-Квандта не выявил гетероскедастичность.

**10.4.** Протестируем гетероскедастичность ошибок при помощи теста Уайта.  $H_0 : \text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2$ ,  $H_a : \text{Var}(\varepsilon_i) = \delta_1 + \delta_2 x_i + \delta_3 z_i + \delta_4 x_i^2 + \delta_5 z_i^2 + \delta_6 x_i z_i$ .

- а) Тестовая статистика  $W = n \cdot R_{aux}^2$ , где  $n$  — число наблюдений,  $R_{aux}^2$  — коэффициент детерминации для вспомогательной регрессии.
- б) Распределение тестовой статистики при верной  $H_0$ :  $W \sim \chi_{k_{aux}-1}^2$ , где  $k_{aux} = 6$  — число регрессоров во вспомогательной регрессии, считая константу.
- в) Наблюдаемое значение тестовой статистики:  $W_{obs} = 18$
- г) Область, в которой  $H_0$  не отвергается:  $W \in [0; W_{crit}] = [0; 11.07]$
- д) Статистический вывод: поскольку  $W_{obs} \notin [0; 11.07]$ , то на основании имеющихся наблюдений на уровне значимости 5% основная гипотеза  $H_0$  отвергается. Таким образом, тест Уайта выявил гетероскедастичность.

**10.5.**  $k(k+1)/2$

**10.6.** 0.0752, 5, 10

**10.7.**

**10.8.**

**10.9.** Одинаковые.

**10.10.**

$$\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_1) = TSS \frac{1}{n_0} \frac{1}{n-2}$$

$$\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}_1) = TSS_0 \frac{n}{n_0} \frac{1}{n_0} \frac{1}{n-2}$$

**10.11.** В предположении о гомоскедастичности,  $\gamma_2 = 0$ , оценка правдоподобия совпадает с МНК-оценкой, значит  $\hat{\beta} = \sum y_i x_i / \sum x_i^2$ . И  $\hat{\sigma}_i^2 = RSS/n$ , значит  $\hat{\gamma}_1 = \ln(RSS/n)$ .

**10.12.**

$$\begin{aligned} \text{Cov}(\hat{\beta}_{GLS}, \varepsilon) &= \text{Cov}((X'\Sigma^{-1}X)^{-1}X'\Sigma^{-1}y, \varepsilon) = \\ &= \text{Cov}((X'\Sigma^{-1}X)^{-1}X'\Sigma^{-1}\varepsilon, \varepsilon) = \\ &= (X'\Sigma^{-1}X)^{-1}X'\Sigma^{-1}\text{Cov}(\varepsilon, \varepsilon) = \\ &= (X'\Sigma^{-1}X)^{-1}X'\Sigma^{-1}\Sigma = (X'\Sigma^{-1}X)^{-1}X' \end{aligned}$$

**10.13.**

**11.1.**  $\hat{\mathbb{P}}(y_i = 1 \mid x_i) = \frac{1}{1+\exp(-\beta_1-\beta_2 x_i)}$

- а)  $loss(\beta_1, \beta_2) = -\sum_{i=1}^l \left( [y_i = 1] \ln \frac{1}{1+\exp(-\beta_1-\beta_2 x_i)} + [y_i = -1] \ln \left( 1 - \frac{1}{1+\exp(-\beta_1-\beta_2 x_i)} \right) \right)$
- б)  $\frac{\partial loss}{\partial \beta_1} = -\sum_{i=1}^l \left( [y_i = 1] \cdot \frac{1}{1+\exp(\beta_1+\beta_2 x_i)} + [y_i = -1] \cdot (-1) \cdot \frac{1}{1+\exp(-\beta_1-\beta_2 x_i)} \right)$

в)  $y_4 = 1, x_4 = 0.8$

### 11.2.

а)  $\Lambda(w) + \Lambda(-w) = 1$

б)  $\Lambda'(w) = -\Lambda'(-w)$

в)  $\Lambda(0) = 0.5, \Lambda'(0) = 0.25, \ln \Lambda(0) = -\ln 2$

г)  $\Lambda^{-1}(p) = \ln \frac{p}{1-p}$

д)  $\frac{d \ln \Lambda(w)}{dw} = \Lambda(-w)$

ж)  $\frac{d \ln \Lambda(-w)}{dw} = -\Lambda(w)$

з)  $\Lambda(0) = 0.5, \Lambda'(0) = 0.25, \ln \Lambda(0) = -\ln 2$

### 11.3.

а) Выпишем аппроксимацию функции потерь:

$$\text{loss}(\beta_1, \beta_2) \approx 100 \ln 2 + 6\beta_1 + 12\beta_2 + \frac{1}{2}(25\beta_1^2 + 2 \cdot 12\beta_1\beta_2 + 12\beta_2^2) \rightarrow \min_{\beta_1, \beta_2}$$

Взяв производные по  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , получим  $\hat{\beta}_1 = \frac{6}{13}, \hat{\beta}_2 = -\frac{19}{13}$ .

б)  $\hat{\mathbb{P}}(\text{honey}_i = 1 \mid \text{bee}_i = 0) = \frac{1}{1 + \exp(-6/13)} \approx 0.615$ .

Это же число можно было получить из таблицы:  $\frac{32}{32+20} \approx 0.61$ .

**11.4.** Предельный эффект максимален при максимальной производной  $\Lambda'(\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x + \hat{\beta}_3 z)$ , то есть при  $\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x + \hat{\beta}_3 z = 0$ .

**11.5.** Ввести штраф в жанре LASSO или гребневой регрессии.

**11.6.**  $z = \frac{\hat{\beta}_2}{se(\hat{\beta}_2)} = \frac{3}{0.3} = 10$ ,  $H_0$  отвергается. Предельный эффект равен  $\hat{\beta}_2 \Lambda'(-0.8) \approx 0.642$ . Для нахождения  $se(\hat{\mathbb{P}})$  найдём линейную аппроксимацию для  $\Lambda(\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x)$  в окрестности точки  $\hat{\beta}_1 = 0.7, \hat{\beta}_2 = 3$ . Получаем

$$\Lambda(\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x) \approx \Lambda(\beta_1 + \beta_2 x) + \Lambda'(\beta_1 + \beta_2 x)(\hat{\beta}_1 - \beta_1) + \Lambda'(\beta_1 + \beta_2 x)x(\hat{\beta}_2 - \beta_2).$$

**11.7.** Если в пробит-уравнении ненаблюдаемой переменной домножить все коэффициенты и стандартную ошибку на произвольную константу, то в результате получится ровно та же модель. Следовательно, модель с  $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0; \sigma^2)$  не идентифицируема. Поэтому надо взять какое-то нормировочное условие. Можно взять, например,  $\beta_2 = 42$ , но традиционно берут  $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0; 1)$ .

### 11.8.



Если посчитать ожидание матрицы Гессе, то оно не зависит от игреков. А значит информация Фишера не зависит от игреков. Поэтому для подсчёта изменения стандартных ошибок достаточно подставить новые оценки вместо истинных значений параметра. Можно также воспользоваться тем, что новые оценки являются линейным преобразованием старых.

**11.9.**

**11.10.**  $F(t) = 1/(1 + \exp(-t))$ .

**11.11.** Они абсолютно равны. Фактически они просто разбили исходную выборку на части и в качестве прогноза для каждой части наблюдений берут долю игреков, равных единице на этой части выборки.

**12.1.**

**12.2.**

**12.3.**

**12.4.**

а)  $\text{plim } \hat{\beta}_2^{LS} = \beta_2 - 1/5$

б)  $\text{plim } \hat{\beta}_2^{IV} = \beta_2$

в)

**12.5.**

**12.6.**

$$\text{plim } \hat{\beta}_2 = \frac{\text{Cov}(y_1, x_1^*)}{\text{Var}(x_1^*)} = \frac{9}{14} \beta_2$$

Оценка  $\hat{\beta}_2$  несостоятельна.

**12.7.**

$$\text{plim } \hat{\beta}_2 = \frac{\text{Cov}(x_1, y_1)}{\text{Var}(x_1)} = \frac{\beta_2 \cdot 9 + \beta_3(-2) + 0}{9} = \beta_2 - \frac{2}{9} \beta_3 \neq \beta_2$$

Оценка несостоятельна.

**12.8.** Для  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i^3 + w_i$ . Оценка  $\hat{\beta}_2$  несостоятельна,  $\text{plim } \hat{\beta}_2 = \beta_2 + 3\beta_3$ , а  $\hat{\beta}_1$  состоятельная.

Трудность проверки несмещённости состоит в зависимости числителя и знаменателя в формуле условного ожидания.

Для  $y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i^2 + w_i$ . Обе оценки будут состоятельными. Вызвано это тем, что  $u_i = \beta_3 x_i^2 + w_i$  некоррелировано с  $x_i$ .

**12.9.**  $\text{plim } \left(\frac{1}{n} x' x\right)^{-1} = 109^{-1}$ ,  $\text{plim } \frac{1}{n} x' u = 0$  и  $\text{plim } (x' x)^{-1} x' u = 0$

**12.10.** Да, например, равномерное распределение  $(u_i, x_i)$  на круге или на окружности. Или равновероятное на восьми точках,  $(\pm 1, \pm 1)$ ,  $(\pm 2, \pm 2)$ .

**12.11.**

$$\text{plim } \hat{\theta}_2 = \frac{\gamma}{\alpha(1-\alpha)}$$

Заметим, что  $\text{Cov}(\text{green}_i, \text{green}_i^*) = 0$ , так как  $\text{green}_i$  — это результат подбрасывания монетки,  $\text{green}_i^*$  определяется характеристиками студента.

Ожидание такое же, хотя считается по-другому,  $\mathbb{E}(\hat{\theta}_2) = \frac{\gamma}{\alpha(1-\alpha)}$ .

**12.12.**

а) Например, можно взять  $u_1 = x_2$ , и все величины  $\mathcal{N}(0; 1)$ .

б) Невозможно, в силу  $\mathbb{E}(u_1 | x_1) = \mathbb{E}(\mathbb{E}(u_1 | x_1, x_2) | x_1)$ .

**12.13.** Одинаково распределены:  $y_1 \sim y_2 \sim y_3$ ,  $x_1 \sim x_2 \sim x_3$ . Независимы переменные с разными номерами.

**13.1.**  $\text{plim } \hat{\alpha} = (\alpha + \beta)/2$

Переменную  $u_{t2}$  можно использовать как инструмент для  $p_t$ . При известной  $u_{t2}$  величина  $\beta$  восстанавливается идеально точно.

**13.2.** В первом уравнении нет проблемы эндогенности, оценка  $\hat{\beta}_{11}$  будет состоятельной.

**13.3.** Без дополнительных ограничений уже по критерию порядка система не идентифицируема. Поэтому без ограничений критерий ранга можно даже не проверять. При наложении ограничений первое уравнение остаётся неидентифицируемым, второе — становится идентифицируемым.

**13.4.**

а) Условие порядка о том, что количество не включённых в правую часть уравнения переменных должно быть не меньше числа включённых эндогенных, выполняется только для второго уравнения системы. Остаётся проверить для второго уравнения условие ранга, оно также окажется выполнено в точке общего положения.

Нарушается условие ранга если

$$\begin{cases} \gamma_{12} = 0 \\ \beta_{13}\gamma_{33} = 0 \end{cases}$$

б) К жёсткой мультиколлинеарности на втором шаге.

На первом шаге будут построены регрессии:

$$\hat{y}_{2t} = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 x_{1t} + \hat{\alpha}_2 x_{2t} + \hat{\alpha}_3 x_{3t}$$

$$\hat{y}_{3t} = \hat{\delta}_0 + \hat{\delta}_1 x_{1t} + \hat{\delta}_2 x_{2t} + \hat{\delta}_3 x_{3t}$$

На втором шаге строим регрессию

$$\hat{y}_{1t} = \hat{\gamma}_{01} + \hat{\beta}_{12}\hat{y}_{2t} + \hat{\beta}_{13}\hat{y}_{3t} + \hat{\gamma}_{11}x_{1t} + \hat{\gamma}_{12}x_{12t}$$

Однако  $\hat{y}_{2t}$  и  $\hat{y}_{3t}$  являются линейными комбинациями  $x_{1t}, x_{2t}, x_{3t}$ , а значит, в регрессии второго шага есть линейно зависимые регрессоры. Поэтому МНК-оценки получить нельзя.

**13.5.**

а) На втором шаге возникнет проблема жёсткой мультиколлинеарности.

б) На втором шаге жёсткой мультиколлинеарности не будет, наблюдений слишком мало. Вероятно, Вовочка ничего не заметит. Оценки IV при малых  $n$  смещены. О состоятельности по 100 наблюдениям говорить бессмысленно. Если бы наблюдений было не 100, а гораздо больше, то из-за проблем с условием ранга, на втором шаге вылезала бы практически жёсткая мультиколлинеарность.

в) Оценки IV при малых  $n$  смещены. О состоятельности по 100 наблюдениям говорить бессмысленно.

14.1.

$$\text{Var}(g) = \text{Var} \left( \begin{pmatrix} y_i - 2\theta \\ 1/y_i - \theta \end{pmatrix} \right)$$

14.2.

14.3.

14.4.

14.5. да, да

14.6. Оценка при единичной весовой матрице равна  $\hat{\theta}_{W=I} = 1.5$ . С точностью до деления на определитель ковариационной матрицы оценка матрицы весов имеет вид:

$$\hat{W} = \begin{pmatrix} 12 & 1 \\ 1 & 102 \end{pmatrix}$$

15.1.  $\hat{\beta}_W = \hat{\beta}_{FD}$ ,  $RSS_W = 2RSS_{FD}$ , обе оценки состоятельны.

15.2.  $\hat{\beta}_W = \hat{\beta}_{FD}$

15.3.

## 17 Источники мудрости

- [Sch] Kurt Schmidheiny. *Lecture Notes in Microeconometrics: Instrumental Variables*. URL: <https://www.schmidheiny.name/teaching/iv.pdf>. У Курта Шмидхайни очень аккуратные и понятные маленькие заметки по разным темам.
- [Pie] Richard G. Pierse. *Some lecture notes on Econometrics: Simultaneous Equations Models: Identification, Estimation and Testing*. URL: <http://rpierse.esy.es/rpierse/files/ec7.pdf>. У Ричарда Пирса много заметок по разным темам, в основном по временным рядам.
- [Zso10] Peter Zsohar. *Short introduction to the generalized method of moments*. 2010. URL: [http://www.ksh.hu/statszemle\\_archive/2012/2012\\_K16/2012\\_K16\\_150.pdf](http://www.ksh.hu/statszemle_archive/2012/2012_K16/2012_K16_150.pdf).