

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (государственный университет)  
ФАКУЛЬТЕТ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР им. А. А. ДОРОВНИЦЫНА РАН  
КАФЕДРА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»

Катруца Александр Михайлович

## **Анализ мультиколлинеарности при выборе признаков**

010656 — Математические и информационные технологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**Научный руководитель:**  
к. ф.-м. н. Стрижов Вадим Викторович

Москва

2014

# Содержание

1	Введение	4
2	Постановка задачи выбора признаков	7
3	Анализ мультиколлинеарности при выборе признаков	8
3.1	Фактор инфляции дисперсии . . . . .	9
3.2	Метод Белсли . . . . .	9
4	Методы построения тестовых выборок	11
5	Критерии сравнения методов выбора признаков	14
6	Вычислительный эксперимент	16
7	Заключение	25

### Аннотация

В данной работе исследуется проблема мультиколлинеарности и её влияние на эффективность методов выбора признаков. Предлагается процедура тестирования методов выбора признаков и методика порождения тестовых выборок с различными типами мультиколлинеарности между признаками. Рассматриваемые методы выбора признаков тестируются на порождённых выборках. Процедура тестирования заключается в применении методов выбора признаков к выборкам с различным типом мультиколлинеарности и оценивании количества мультиколлинеарных признаков в множестве отобранных признаков. В работе приводится критерий сравнения методов выбора признаков, на котором основана процедура их тестирования. Также методы выбора признаков сравниваются согласно различным функционалам качества. Проведено сравнение методов выбора признаков в случае наличия в данных определённого типа мультиколлинеарности, и сделан вывод о качестве работы рассматриваемых методов на определённых типах данных.

**Ключевые слова:** *регрессионный анализ, выбор признаков, мультиколлинеарность, тестовые выборки.*

# 1 Введение

**Актуальность темы.** Проблема построения устойчивых прогностических моделей, предназначенных для длительной эксплуатации возникает при решении задач прогнозирования состояний технических, биологических и социальных систем. Одной из основных причин неустойчивости моделей является наличие мультиколлинеарности результатов измерений. Одним из способов устранения мультиколлинеарности и повышения устойчивости модели является отбор наиболее значимых признаков. Определение наиболее оптимального метода выбора признаков для конкретной задачи является актуальной проблемой машинного обучения.

**Цель работы.** Построение процедуры тестирования методов выбора признаков на предмет наличия мультиколлинеарности в множестве отобранных признаков для получения наиболее устойчивой прогностической модели.

**Методы исследований.** При построении алгоритма тестирования методов выбора признаков использовались элементы теории вероятностей, математической статистики и линейной алгебры. Для программной реализации разработанного алгоритма использовалась среда MATLAB.

**Научная новизна.**

- Предложена процедура генерации тестовых выборок для анализа методов выбора признаков;
- разработан критерий ранжирования методов выбора признаков при наличии в данных мультиколлинеарности;

**Практическая ценность.** Разработан программный модуль, который

- генерирует тестовые выборки в соответствии с заданными параметрами;
- применяет рассматриваемые методы выбора признаков к построенным выборкам;
- ранжирует методы выбора признаков по заданному внешнему критерию качества.

## Положения, выносимые на защиту.

- Процедура порождения тестовых выборок для анализа методов выбора признаков;
- алгоритм ранжирования методов выбора признаков.

**Обзор литературы.** Работа посвящена тестированию методов выбора признаков. Предполагается, что исследуемая выборка содержит значительное число мультиколлинеарных признаков. *Мультиколлинеарность* — это сильная корреляционная связь между отбираемыми для анализа признаками, совместно воздействующими на целевой вектор, которая затрудняет оценивание регрессионных параметров и выявление зависимости между признаками и целевым вектором. Проблема мультиколлинеарности, возможные способы её обнаружения и устранения описаны в [1, 2, 3]. Также мультиколлинеарность приводит к уменьшению устойчивости оценок вектора параметров. Оценка вектора параметров называется устойчивой, если малое изменение некоторой компоненты этого вектора приводит к малому изменению соответствующей компоненты оценки целевого вектора.

В задачах анализа данных для уменьшения размерности [4], упрощения использования стандартных алгоритмов машинного обучения [5] и удаления нерелевантных признаков [6] применяются методы выбора признаков. Также методы выбора признаков используются для решения проблемы мультиколлинеарности в задачах регрессии [7].

Задача выбора оптимального подмножества признаков является одной из основных задач предварительной обработки данных. Методы выбора признаков основаны на минимизации некоторого функционала, который отражает качество рассматриваемого подмножества признаков. В [8, 9, 10] сделан обзор существующих методов выбора признаков, проведена классификация методов выбора признаков по используемым функционалам качества и стратегии поиска оптимального подмножества признаков.

При наличии мультиколлинеарности в регрессионных задачах применение методов выбора признаков приводит к повышению устойчивости оценок параметров и уменьшению их дисперсии. Для этого используются методы отбора признаков с различными регуляризаторами или стратегиями добавления и удаления признаков с использованием статистических тестов для проверки значимости добавляемого признака. Примерами методов, использующих регуляризаторы, являются гребневая регрессия [11], где регуля-

ризатор — взвешенная евклидова норма вектора параметров, Lasso [12] и LARS [13], где регуляризатор — взвешенная сумма модулей параметров, Elastic net [14], где регуляризатор — линейная комбинация предыдущих двух регуляризаторов. Методом, использующим проверку значимости добавляемого или удаляемого признака является шаговая регрессия [15] с различными комбинациями процедур добавления или удаления признаков

Для тестирования методов выбора признаков в [7] предложен метод генерации выборок и функционал, позволяющий оценить качество процедуры выбора признаков. Однако предложенный способ не позволяет оценить изменение критерия качества при непрерывном изменении параметров выборок и структурного параметра мультиколлинеарности.

В данной работе предложена другая процедура генерации тестовых выборок, основанная на задании свойств признаков. Рассматриваются следующие свойства признаков: мультиколлинеарность между признаками, коррелированность целевому вектору, ортогональность между признаками, ортогональность признаков целевому вектору. Задание количества признаков обладающих каждым из этих свойств позволяет генерировать выборки с различным взаимным расположением признаков и целевого вектора. Такой метод генерации тестовых выборок даёт возможность исследовать зависимость эффективности методов выбора признаков при непрерывном изменении параметра мультиколлинеарности.

В работе предложен критерий ранжирования методов выбора признаков и методика их тестирования. Критерием ранжирования является количество мультиколлинеарных признаков в множестве отобранных признаков удаление которых приводит к росту ошибки не больше некоторого заданного наперёд значения критической ошибки. Методика тестирования заключается в последовательном применении различных методов выбора признаков к тестовым выборкам, каждая из которых отражает некоторый тип мультиколлинеарности и оценке качества полученного подмножества признаков для каждой пары, включающей метод выбора признаков и тестовую выборку.

## 2 Постановка задачи выбора признаков

Задана выборка  $\mathcal{D} = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}$ ,  $i \in \mathcal{I} = \{1, \dots, m\}$ , множество свободных переменных — вектор  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_j, \dots, x_n]$ , где  $j \in \mathcal{J} = \{1, \dots, n\}$ . Предполагается, что эти переменные принадлежат множеству действительных чисел, либо его подмножеству:  $\mathbf{x}_i \in \mathbb{X} \subseteq \mathbb{R}^n$  и  $y_i \in \mathbb{Y} \subseteq \mathbb{R}^1$ . Введём обозначения:  $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_m]^\top$  — вектор значений зависимой переменной, целевой вектор,  $\boldsymbol{\chi}_j = [x_{1j}, \dots, x_{mj}]^\top$  — реализация  $j$ -ой свободной переменной,  $j$ -ый признак и  $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1^\top, \dots, \mathbf{x}_m^\top]^\top = [\boldsymbol{\chi}_1, \dots, \boldsymbol{\chi}_n]$  — матрица плана. Предполагается, что вектор  $\mathbf{x}_i$  и число  $y_i$  связаны соотношением:

$$y_i = f(\mathbf{w}, \mathbf{x}_i) + \varepsilon(\mathbf{x}_i), \quad (2.1)$$

где  $f : \mathbb{W} \times \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{Y}$  отображение декартова произведения пространства допустимых параметров  $\mathbb{W}$  и пространства значений  $\mathbb{X}$  свободной переменной в область значений  $\mathbb{Y}$  зависимой переменной, а  $\varepsilon(\mathbf{x}_i)$  —  $i$ -ая компонента вектора регрессионных остатков  $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{f} - \mathbf{y}$ . Обозначим вектор-функцию:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{w}, \mathbf{X}) = [f(\mathbf{w}, \mathbf{x}_1), \dots, f(\mathbf{w}, \mathbf{x}_m)]^\top \in \mathbb{Y}^m.$$

Определим функцию ошибки

$$S : \mathbb{X} \times \mathbb{W} \times \mathbb{Y} \rightarrow \mathbb{R}_+$$

и представление множества индексов элементов выборки в виде:

$$\mathcal{I} = \mathcal{L} \cup \mathcal{C}.$$

Далее в качестве функции ошибки  $S$  зададим квадрат нормы вектора регрессионных остатков  $\boldsymbol{\varepsilon}$ :

$$S = \sum_{i=1}^m \varepsilon^2(\mathbf{x}_i) = \text{RSS}, \quad \text{TSS} = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2, \quad \text{где } \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i. \quad (2.2)$$

Требуется найти такой оптимальный вектор параметров  $\mathbf{w}^* \in \mathbb{W}$ , что функция  $f(\mathbf{w}^*, \mathbf{x})$  приближает целевой вектор  $\mathbf{y}$  наилучшим образом в смысле функции ошибки  $S$ .

Назовём моделью пару  $(\mathbf{f}, \mathcal{A})$ , где  $\mathcal{A} \subset \mathcal{J}$  — подмножество индексов признаков, используемое для вычисления вектор-функции  $\mathbf{f}$ . Ниже фиксирована функция  $\mathbf{f} = \mathbf{X}\mathbf{w}$ ,

после этого модель зависит только от множества  $\mathcal{A}$ , поэтому вместо  $(\mathbf{f}, \mathcal{A})$  для обозначения используемой модели будем использовать  $\mathcal{A}$ . Таким образом, выбор модели сводится к нахождению оптимального множества индексов  $\mathcal{A}^*$  в смысле функции ошибки  $S$ , вычисляемой на элементах выборки  $\mathfrak{D}_{\mathcal{L}}$ :

$$\mathcal{A}^* = \arg \min_{\mathcal{A} \subset \mathcal{J}} S(\mathcal{A} | \mathbf{w}^*, \mathfrak{D}_{\mathcal{L}}). \quad (2.3)$$

Для решения задачи (2.3) необходимо найти вектор параметров  $\mathbf{w}^*$  как решение задачи минимизации функции ошибки на элементах выборки  $\mathfrak{D}_{\mathcal{L}}$  с индексами из множества  $\mathcal{L}$ :

$$\mathbf{w}^* = \arg \min_{\mathbf{w} \in \mathbb{W}} S(\mathbf{w} | \mathfrak{D}_{\mathcal{L}}, \mathcal{A}). \quad (2.4)$$

Задача (2.3) является задачей выбора признаков и заключается в нахождении подмножества индексов признаков  $\mathcal{A}^* \subset \mathcal{J}$ , минимизирующего функцию ошибки  $S$ .

### 3 Анализ мультиколлинеарности при выборе признаков

В дальнейшем будем считать, что векторы признаков  $\boldsymbol{\chi}_j$  и целевой вектор  $\mathbf{y}$  нормированны. Рассмотрим некоторое подмножество  $\mathcal{B} \subset \mathcal{J}$  индексов признаков. Назовём признаки *мультиколлинеарными*, если найдутся такие коэффициенты  $a_k$ ,  $k \in \mathcal{B}$  и достаточно малое  $\delta > 0$ , что

$$\left\| \boldsymbol{\chi}_j - \sum_{k \in \mathcal{B}} a_k \boldsymbol{\chi}_k \right\| < \delta, \quad (3.1)$$

где  $j$  — индекс признака и  $j \notin \mathcal{B}$ . Чем меньше  $\delta$ , тем выше степень мультиколлинеарности.

Назовём признаки с индексами  $i, j$  *коррелирующими*, если найдётся достаточно малое  $\delta_{ij} > 0$  такое, что:

$$\|\boldsymbol{\chi}_i - \boldsymbol{\chi}_j\| < \delta_{ij} \quad (3.2)$$

Из определения следует, что  $\delta_{ij} = \delta_{ji}$  и формула (3.2) есть частный случай формулы (3.1) при  $a_k = 0$ ,  $k \neq j$  и  $a_k = 1$ ,  $k = j$ .

Назовём признак  $\boldsymbol{\chi}_j$  *коррелированным с целевым вектором*, если найдётся достаточно малое  $\delta_{yj} > 0$ , такое что:

$$\|\mathbf{y} - \boldsymbol{\chi}_j\| < \delta_{yj}.$$



### 3.1 Фактор инфляции дисперсии

Широко известным критерием анализа мультиколлинеарности авторы считают фактор инфляции дисперсии [16]. Фактор инфляции дисперсии  $VIF_j$  определяется для  $j$ -го признака и является показателем наличия линейной зависимости между  $j$ -ым и остальными признаками. Для нахождения  $VIF_j$  необходимо определить оценку  $\hat{\mathbf{w}}$  для вектора коэффициентов  $\mathbf{w}$  в задаче (2.1) при  $y_i = x_{ij}$ ,  $i \in \mathcal{I}$  и  $\mathcal{J} = \mathcal{J} \setminus j$ . Аналогично (2.2) определяются RSS и TSS. Величина  $VIF_j$  определяется следующим выражением:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2},$$

где  $R_j^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$  — коэффициент детерминации. Согласно [16] значение  $VIF_j \gtrsim 5$  означает наличие зависимости между  $j$ -ым и всеми остальными признаками.

Недостатками этого критерия мультиколлинеарности является то, что он может принимать большие значения сразу для нескольких признаков, что мешает определить какой из признаков необходимо удалить.

Другим критерием наличия мультиколлинеарности между признаками является число обусловленности  $\kappa$  матрицы  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ , которое равно отношению максимального и минимального по модулю собственных чисел  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$ :

$$\kappa = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}.$$

Оно показывает насколько матрица  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  близка к вырожденной. Чем больше  $\kappa$ , тем ближе матрица к вырожденной.

### 3.2 Метод Белсли

Для обнаружения и исключения мультиколлинеарных признаков в наборе отобранных признаков предлагается явно поставить оптимизационную задачу, используя метод Белсли. Критерием сравнения методов выбора признаков в данной работе является критерий, основанный на исключении признака, мультиколлинеарного некоторым другим признакам из набора выбранных признаков. Исключение проводится методом Белсли. Формальной записью предлагаемого критерия является задача (5.1). Предлагаемый критерий сравнения методов выбора признаков в дальнейшем называется критерием наличия мультиколлинеарных признаков среди отобранных признаков.

Будем считать, что на множестве параметров  $\mathbb{W}$  задано нормальное распределение

$$\mathbf{w} \sim \mathcal{N}(\mathbf{w}_{\text{ML}}, \mathbf{A}^{-1})$$

с матожиданием  $\mathbf{w}_{\text{ML}}$  и ковариационной матрицей  $\mathbf{A}^{-1}$ . Оценка  $\hat{\mathbf{A}}^{-1}$  ковариационной матрицы  $\mathbf{A}^{-1}$  в случае линейной модели:

$$\hat{\mathbf{A}}^{-1} = (\mathbf{X}^\top \mathbf{X})^{-1}.$$

Используя сингулярное разложение матрицы  $\mathbf{X}$ :

$$\mathbf{X} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^\top,$$

где  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$  — ортогональные матрицы, а  $\mathbf{\Lambda}$  — диагональная с собственными значениями  $\lambda_i$  на диагонали, такими что

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n,$$

получим выражение для  $(\mathbf{X}^\top \mathbf{X})^{-1}$ :

$$(\mathbf{X}^\top \mathbf{X})^{-1} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^{-2} \mathbf{V}^{-1}.$$

Столбцы матрицы  $\mathbf{V}$  — собственные векторы, а квадраты сингулярных чисел — собственные значения матрицы  $\mathbf{X}^\top \mathbf{X}$ :

$$\mathbf{X}^\top \mathbf{X} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^\top \mathbf{U}^\top \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^\top = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^2 \mathbf{V}^\top,$$

$$\mathbf{X}^\top \mathbf{X} \mathbf{V} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^2.$$

Отношение максимального собственного значение  $\lambda_{\text{max}}$  к  $i$ -ому собственному значению  $\lambda_i$  назовём индексом обусловленности  $\eta_i$

$$\eta_i = \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_i}.$$

Большое значение  $\eta_i$  указывает на зависимость близкую к линейной между признаками и чем больше  $\eta_i$  тем сильнее зависимость. Поэтому на этапе удаления нужно найти такой индекс  $i^*$ , что

$$i^* = \arg \max_{i \in \mathcal{F}_{k-1}} \eta_i,$$

где  $\mathcal{F}_{k-1}$  текущее подмножество признаков.

Оценками дисперсий параметров будут диагональные элементы матрицы  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ :

$$\text{Var}(w_i) = \sum_{j=1}^n \frac{v_{ij}^2}{\lambda_j^2}.$$

Далее определим дисперсионную долю  $q_{ij}$  как вклад  $j$ -го признака в дисперсию  $i$ -го элемента вектора параметров  $\mathbf{w}$ :

$$q_{ij} = \frac{v_{ij}^2 / \lambda_j^2}{\sum_{j=1}^n v_{ij}^2 / \lambda_j^2},$$

где  $[v_{ij}] = \mathbf{V}$ , а  $\lambda_j$  — собственное значение. Большие значения дисперсионных долей означают наличие зависимостей между признаками, это следует из способа их получения.

Следовательно, по найденному максимальному индексу обусловленности  $i^*$  находим признак  $j^*$

$$j^* = \arg \max_{j \in \mathcal{F}_{k-1}} q_{i^*j}, \quad (3.3)$$

который вносит наибольший вклад в дисперсию  $i$ -го элемента вектора  $\mathbf{w}$ , то есть является коллинеарным некоторому другому признаку.

## 4 Методы построения тестовых выборок

Для тестирования методов выбора признаков предлагается использовать следующие синтетические выборки. Определим следующие множества задающие структуру выборки:

- 1) множество ортогональных признаков  $\chi_j$  с индексами  $j$  из множества  $\mathcal{P}_f$ ;
- 2) множество признаков  $\chi_j$  ортогональных целевому вектору  $\mathbf{y}$  с индексами  $j$  из множества  $\mathcal{P}_y$ ;
- 3) множество мультиколлинеарных признаков  $\chi_j$  с индексами  $j$  из множества  $\mathcal{C}_f$ ;
- 4) множество признаков  $\chi_j$ , коррелирующих с целевым вектором, с индексами  $j$  из множества  $\mathcal{C}_y$  ;
- 5) множество случайных признаков  $\chi_j$  с индексами из множества  $\mathcal{R}$ .

Для регулирования степени мультиколлинеарности используется параметр мультиколлинеарности  $k$ : при  $k = 1$  признаки коллинеарны, при  $k = 0$  — ортогональны.

При этом параметр  $k$  используется как для определения степени мультиколлинеарности признаков, так и для определения степени коррелированности признаков и целевого вектора.

Рассмотрим базовые варианты взаимного расположения мультиколлинеарных признаков и целевого вектора, из которых варьированием параметров можно генерировать различные выборки для тестирования методов выбора признаков.

1. Признаки  $\chi_j$  с индексами как из множества  $j \in \mathcal{C}_f$  мультиколлинеарных между собой признаков, так и из множества  $j \in \mathcal{P}_y$  ортогональных целевому вектору  $\mathbf{y}$ :

$$\langle \mathbf{y}, \chi_j \rangle = 0, \quad j \in \mathcal{J}, \quad \left\| \chi_i - \sum_{l \in \mathcal{B}} \alpha_l \chi_l \right\| < \delta, \quad i \in \mathcal{J}, \quad i \notin \mathcal{B} \subset \mathcal{J} \quad (4.1)$$

$$\mathcal{J} = \mathcal{P}_y \cap \mathcal{C}_f.$$

Схематично взаимное расположение признаков и целевого вектора изображено на рис. 1. Выборки с такой структурой будем называть выборками первого типа.

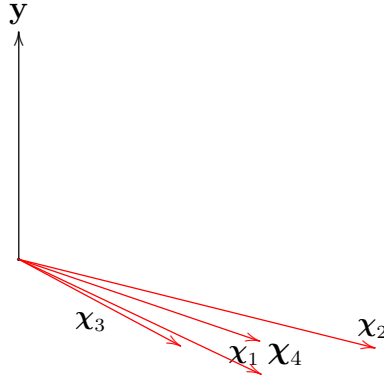


Рис. 1: Схематичное изображение выборок первого типа

2. Все признаки  $\chi_j$  порождены случайно из многомерной случайной величины. Эта случайная величина взята из равномерного распределения на единичном кубе размерности  $r$ . Найдётся некоторый признак  $\chi_i$  приближающий целевой вектор  $\mathbf{y}$ :

$$\mathcal{J} = \mathcal{R}, \quad \chi_1, \dots, \chi_r \sim U[0, 1]^r, \quad \|\mathbf{y} - \chi_i\| < \delta. \quad (4.2)$$

Схематично взаимное расположение признаков и целевого вектора изображено на рис. 2. Выборки с такой структурой будем называть выборками второго типа.

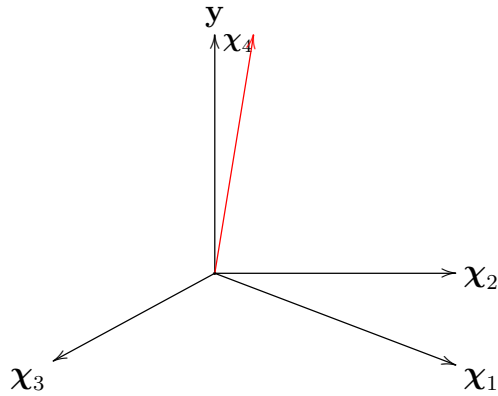


Рис. 2: Схематичное изображение выборок второго типа

3. Все признаки  $\chi_j$  коррелируют и хорошо приближают целевой вектор  $\mathbf{y}$ :

$$\|\chi_i - \chi_j\| < \delta_{ij}, \quad i, j \in \mathcal{J}, \quad \|\mathbf{y} - \chi_j\| < \delta, \quad j \in \mathcal{J}, \quad \mathcal{J} = \mathcal{C}_y \quad (4.3)$$

Схематично расположение признаков и целевого вектора изображено на рис. 3. Выборки с такой структурой будем называть выборками третьего типа.

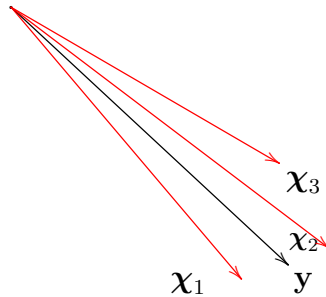


Рис. 3: Схематичное изображение выборок третьего типа

4. Множество признаков  $\chi_j$  с индексами из множества  $j \in \mathcal{J}$  состоит из объединения двух множеств: множества ортогональных признаков с индексами из множества  $\mathcal{P}_f$  и множества признаков  $\chi_c$ , коррелированных с некоторыми из них. Индексы  $c$  лежат в множестве  $\mathcal{C}_f$ . При этом целевой вектор  $\mathbf{y}$  хорошо приближается линейной

комбинацией ортогональных признаков  $\chi_j$ ,  $j \in \mathcal{P}_f$ :

$$\langle \chi_i, \chi_j \rangle = 0, \quad i, j \in \mathcal{P}_f, \quad \|\chi_i - \chi_j\| < \delta_{ij}, \quad i \in \mathcal{P}_f, j \in \mathcal{C}_f, \quad \mathbf{y} = \sum_{j \in \mathcal{P}_f} a_j \chi_j, \quad (4.4)$$

$$\mathcal{J} = \mathcal{P}_f \cup \mathcal{C}_f.$$

Схематично взаимное расположение признаков и целевого вектора изображено на рис. 4. Выборки с такой структурой будем называть выборками четвёртого типа.

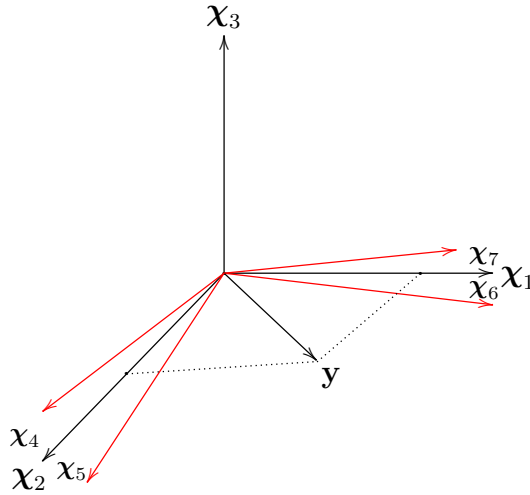


Рис. 4: Схематичное изображение выборок четвёртого типа

Комбинируя вышеописанные варианты взаимного расположения признаков и целевого вектора, варьируя параметр мультиколлинеарности, а также, изменяя мощности  $p_f, p_y, c_f, c_y$  и  $r$  множеств  $\mathcal{P}_f, \mathcal{P}_y, \mathcal{C}_f, \mathcal{C}_y$  и  $\mathcal{R}$ , можно генерировать выборки для тестирования методов выбора признаков.

## 5 Критерии сравнения методов выбора признаков

Для анализа методов выбора признаков определим следующий критерий, позволяющий оценить сколько мультиколлинеарных признаков есть в множестве отобранных признаков. Зададим некоторое предельное значение  $s_0$  функции ошибки  $S$ . Результатом работы метода выбора признаков является набор признаков с индексами из множества  $\mathcal{A} \subset \mathcal{J}$ . Для найденного множества признаков получен оптимальный вектор параметров  $\mathbf{w}_{\mathcal{A}}^*$ . Назовём  $h$  максимальную мощность множества индексов признаков  $\mathcal{J}_h \subset \mathcal{A}$ ,

при удалении которого значение функции ошибки  $S$  не превосходит  $s_0$ :

$$h = \arg \max_{S(\mathcal{J}_h, \mathbf{w}_h, \mathfrak{D}) \leq s_0} |\mathcal{J}_h|, \quad (5.1)$$

где  $S(\mathcal{J}_h, \mathbf{w}_h, \mathfrak{D})$  — функция ошибки, в которой первый аргумент — это матрица  $\mathbf{X}$  со столбцами, индексы которых лежат в множестве  $\mathcal{J}_h$ , второй аргумент — вектор параметров  $\mathbf{w}_h$ , составленный из элементов  $\mathbf{w}_{\mathcal{A}}^*$  с индексами из множества  $\mathcal{J}_h$  и третий аргумент — выборка. В разделе вычислительный эксперимент определялась величина  $d$  равная количеству признаков, удаление которых приводит к ошибке, не превышающей  $s_0$ :

$$d = |\mathcal{A}| - h.$$

Определение индексов удаляемых признаков проводилось методом Белсли, задача (3.3). Методы выбора признаков ранжируются по возрастанию величины  $d$ : большие значения  $d$  показывают, что выбранное подмножество признаков  $\mathcal{A}^*$  (решение задачи (2.3)) содержит избыточные признаки, удаление которых приводит к росту функции ошибки вплоть до  $s_0$ .

Ранее авторами в [16, 17] были предложены следующие критерии сравнения линейных регрессионных моделей:

1. Скорректированный коэффициент детерминации  $R_{\text{adj}}^2$  учитывает добавление избыточных признаков и выражается как:

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{\text{RSS}/(m - k)}{\text{TSS}/(m - 1)}.$$

Чем ближе значение  $R_{\text{adj}}^2$  к единице, тем лучше модель описывает целевой вектор.

2. Критерий  $C_p$  позволяет достичь компромисса между величиной RSS и количеством используемых переменных  $p$ , а также ликвидировать возможную коллинеарность признаков. Величина  $C_p$  определяется следующим образом:

$$C_p = \frac{\text{RSS}_p}{\text{RSS}} - m + 2p,$$

где  $\text{RSS}_p$  — это величина, аналогичная RSS, но найденная при использовании  $p$  признаков. Меньшие значения  $C_p$  соответствуют лучшему набору признаков.

3. Информационный критерий BIC вычисляется по следующей формуле:

$$\text{BIC} = \text{RSS} + p \log m.$$

Чем меньше величина BIC, тем лучше модель описывает целевой вектор.

4.  $F$ -тест используется в случае линейной модели для проверки отсутствия релевантных признаков. Если ни один из признаков не приближает целевой вектор, то величина

$$\frac{(\text{TSS} - \text{RSS})/p}{\text{RSS}/(n - p - 1)} \sim F_{p, n-p-1}$$

имеет распределение Фишера с  $p, n - p - 1$  степенями свободы.

## 6 Вычислительный эксперимент

В вычислительном эксперименте проведено сравнение методов выбора признаков по различным функционалам качества при фиксированном значении предельной функции ошибки  $s_0 = 0.5$  и при двух значениях параметра мультиколлинеарности  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$ . Для каждой выборки и для каждого метода выбора признаков были получены зависимости между предельным значением функции ошибки  $s_0$  и максимальным числом  $d$ , а также между фактором инфляции дисперсии VIF и параметром мультиколлинеарности  $k$ . При этом VIF определялся для признаков из множества  $\mathcal{A}^*$ , что показывает наличие мультиколлинеарных признаков в множестве отобранных признаков  $\mathcal{A}^*$ . Эксперименты проводились на выборках при  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$ . Для выборок второго типа график зависимости VIF от параметра мультиколлинеарности  $k$  и количества избыточных признаков  $d$  в множестве отобранных признаков от предельного значения функции ошибки  $s_0$  не строился, так как в этом типе выборок нет мультиколлинеарных признаков.

В экспериментах генерировались выборки четырёх типов, определяемых формулами 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 для двух значений параметра мультиколлинеарности  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$ . Перед проведением экспериментов векторы признаков и целевой вектор были нормированы, так что евклидова норма векторов признаков и целевого вектора равна единице. Измеряемые значения критериев усреднены по 5 повторениям. Значения элементов вектора  $\mathbf{w}$  меньше  $10^{-6}$  считались незначительными и равными нулю.



Значения  $p$ -value соответствуют проверке нулевой гипотезы о том, что вектор параметров  $\mathbf{w}$  — нулевой, против альтернативы, что среди столбцов матрицы  $\mathbf{X}$  есть подходящие для описания целевого вектора  $\mathbf{y}$ , при уровне значимости 0.05. Если значение  $p$ -value меньше 0.05, то нулевая гипотеза отвергается. Величина предельной функции ошибки  $s_0 = 0.5$ .

Сравнивались методы LARS, Lasso, ElasticNet, Ridge и Stepwise. Все кроме последнего являются методами, которые одновременно решают задачи (2.4) и (2.3). Отбор признаков проводится обнулением незначущих коэффициентов в оптимальном векторе параметров  $\mathbf{w}^*$ . Метод Stepwise последовательно решает задачи (2.3) и (2.4), добавляя и удаляя признаки в соответствии с их значимостью, определяемой статистическим тестом. Для алгоритма ElasticNet используется одинаковый вес для штрафа Lasso и Ridge равный 0.5. Прочерк в таблице означает, что метод выбора признаков не отбирает ни один признак и получаемый вектор  $\mathbf{w}$  нулевой.

Для выборок первого типа  $n = p_y = 50$ ,  $m = 1000$ , результаты приведены в таблицах 1 и 2 для  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$  соответственно.

Таблица 1: Значения функционалов качества для выборок первого типа при  $k = 0.2$ .

	$d$	$C_p$	RSS	$\kappa$	VIF	$R_{\text{adj}}^2$	BIC	$p$ -value
Lasso	0	−997	1	3.84	1.05	−3.32	314.62	0.11
Ridge	0	−997	1	4.13	1.05	−3.31	346.39	0.1
LARS	0	−997	—	—	—	—	—	—
Stepwise	0	−997	1	4.13	1.05	−3.41	346.41	$5.28 \cdot 10^{-4}$
Elastic Net	0	−997	1	3.84	1.05	−3.32	314.32	0.11

Таблица 2: Значения функционалов качества для выборок первого типа при  $k = 0.8$

	$d$	$C_p$	RSS	$\kappa$	VIF	$R_{\text{adj}}^2$	BIC	$p$ -value
Lasso	0	−997	1	717.8	16.6	−3.32	310.48	0.06
Ridge	0	−997	1	801	16.6	−3.31	346.39	0.05
LARS	—	−997	—	—	—	—	—	—
Stepwise	0	−997	1.68	801	16.6	−6.22	347.01	$10^{-10}$
Elastic Net	0	−997	1	717.8	16.6	−3.32	310.48	0.06

Для выборок второго типа  $n = r = 50$ ,  $m = 1000$ , результаты приведены в таблице 3. Для выборок третьего типа  $n = c_y = 50$ ,  $m = 1000$ , результаты приведены в таблицах 4 и

Таблица 3: Значения функционалов качества для выборок второго типа

	$d$	$C_p$	RSS	$\kappa$	VIF	$R_{\text{adj}}^2$	BIC	$p$ -value
Lasso	0	$7 \cdot 10^6$	$8.50 \cdot 10^{-4}$	1	0.25	1	6.9	0
Elastic Net	0	$8.76 \cdot 10^{-4}$	$8.76 \cdot 10^{-4}$	1	0.25	1	6.9	0
Ridge	0	$7.97 \cdot 10^9$	0.97	1	0.25	-3	7.88	0
LARS	0.2	-997	$1.3 \cdot 10^{-10}$	2.19	0.32	1	8.29	0
Stepwise	4.6	-997	$1.33 \cdot 10^{-10}$	28.86	0.89	1	53.88	0

5 для  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$  соответственно.

Таблица 4: Значения функционалов качества для выборок третьего типа при  $k = 0.2$

	$d$	$C_p$	RSS	$\kappa, \cdot 10^8$	VIF, $\cdot 10^7$	$R_{\text{adj}}^2$	BIC	$p$ -value
Ridge	0	$2.3 \cdot 10^9$	0.97	24	1.14	-3.17	346.36	0
Lasso	1	$2 \cdot 10^6$	$8.5 \cdot 10^{-4}$	0.95	0.58	1	13.82	0
Elastic Net	3.2	$2 \cdot 10^6$	$8.5 \cdot 10^{-4}$	2.8	0.97	1	41.45	0
Stepwise	36	-997	$4.22 \cdot 10^{-10}$	24	1.14	1	345.39	0
LARS	36	-997	$4.22 \cdot 10^{-10}$	24	1.14	1	345.39	0

Таблица 5: Значения функционалов качества для выборок третьего типа при  $k = 0.8$

	$d$	$C_p$	RSS	$\kappa$	VIF	$R_{\text{adj}}^2$	BIC	$p$ -value
Lasso	0	$5.16 \cdot 10^8$	$8.5 \cdot 10^{-4}$	1	0.24	1	6.9	0
Ridge	0	$5.9 \cdot 10^{11}$	0.97	$6.07 \cdot 10^{11}$	$2.9 \cdot 10^9$	-3.17	346.36	0
Elastic Net	3.2	$5.16 \cdot 10^8$	$8.5 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{10}$	$2.5 \cdot 10^9$	1	41.45	0
Stepwise	36	-997	$1.73 \cdot 10^{-12}$	$6.07 \cdot 10^{11}$	$2.9 \cdot 10^9$	1	345.39	0
LARS	36	-997	$1.65 \cdot 10^{-12}$	$6.07 \cdot 10^{11}$	$2.9 \cdot 10^9$	1	345.39	0

Для выборок четвёртого типа  $p_f = 10$ ,  $c_f = 40$ ,  $m = 1000$ , результаты приведены в таблицах 6 и 7 для  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$  соответственно.

На рисунках 5, 6, 7 представлена зависимость VIF от параметра мультиколлинеар-

Таблица 6: Значения функционалов качества для выборок четвёртого типа при  $k = 0.2$

	$d$	$C_p$	RSS	$\kappa$	VIF	$R_{\text{adj}}^2$	BIC	$p$ -value
Ridge	0	$6 \cdot 10^{30}$	0.95	$8.42 \cdot 10^{15}$	$1.15 \cdot 10^{23}$	-3	210.95	0
Stepwise	1	-868.95	$5.45 \cdot 10^{-29}$	1	0.63	1	13.82	0
LARS	1.8	$5.38 \cdot 10^{29}$	0.38	$2.1 \cdot 10^{16}$	$3.3 \cdot 10^{30}$	-0.62	102.62	0
Lasso	18	$5.84 \cdot 10^{27}$	$9.18 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{16}$	$5.32 \cdot 10^{20}$	1	150.6	0
Elastic Net	17.6	$5.84 \cdot 10^{27}$	$9.18 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{16}$	$5.32 \cdot 10^{20}$	1	150.59	0

Таблица 7: Значения функционалов качества для выборок четвёртого типа при  $k = 0.8$

	$d$	$C_p$	RSS	$\kappa$	VIF	$R_{\text{adj}}^2$	BIC	$p$ -value
Ridge	0	$1.8 \cdot 10^{30}$	0.95	$10^{16}$	$8.65 \cdot 10^{16}$	-2.97	152.92	0
Stepwise	1	$9.4 \cdot 10^5$	$8.8 \cdot 10^{-25}$	1	0.63	1	13.82	0
LARS	1.2	$10^{30}$	0.38	$3 \cdot 10^{29}$	$10^{20}$	-0.57	108.15	0
Lasso	14.8	$1.73 \cdot 10^{27}$	$9.2 \cdot 10^{-4}$	$9.92 \cdot 10^{15}$	$10^{17}$	1	150.59	0
Elastic Net	15.2	$1.7 \cdot 10^{27}$	$9.2 \cdot 10^{-4}$	$9.92 \cdot 10^{15}$	$10^{17}$	1	150.59	0

ности  $k$  для каждого типа выборок, где эта зависимость имеет место.

На рис. 5 показана зависимость VIF от параметра мультиколлинеарности  $k$  для первого типа выборок при работе различных алгоритмов. На рисунке видно, что все алгоритмы показывают одинаковые результаты, и ни один из рассматриваемых методов выбора признаков не решает проблему мультиколлинеарности в случае ортогональности всех признаков целевому вектору и взаимной коррелированности.

На рис. 6 изображена зависимость VIF от параметра мультиколлинеарности  $k$  для третьего типа выборок. Видно, что все методы показывают одинаковый вид зависимости, кроме метода Lasso. Для него при росте параметра мультиколлинеарности наблюдается резкое уменьшение величины VIF. Это говорит об отсутствии линейной зависимости между выбранными признаками в выборках, сгенерированных при  $k \gtrsim 0.4$ .

На рис. 7 показана зависимость VIF от параметра мультиколлинеарности  $k$  для четвёртого типа выборок при работе различных методов. Метод LARS показывает резкие скачки значений VIF (рис. 7 а)). Это не позволяет оценить зависимость VIF от  $k$  для других методов, поэтому на рис. 7 б) изображены аналогичные графики для всех рассматриваемых методов, кроме LARS. Методы Lasso и ElasticNet демонстрируют скачки,

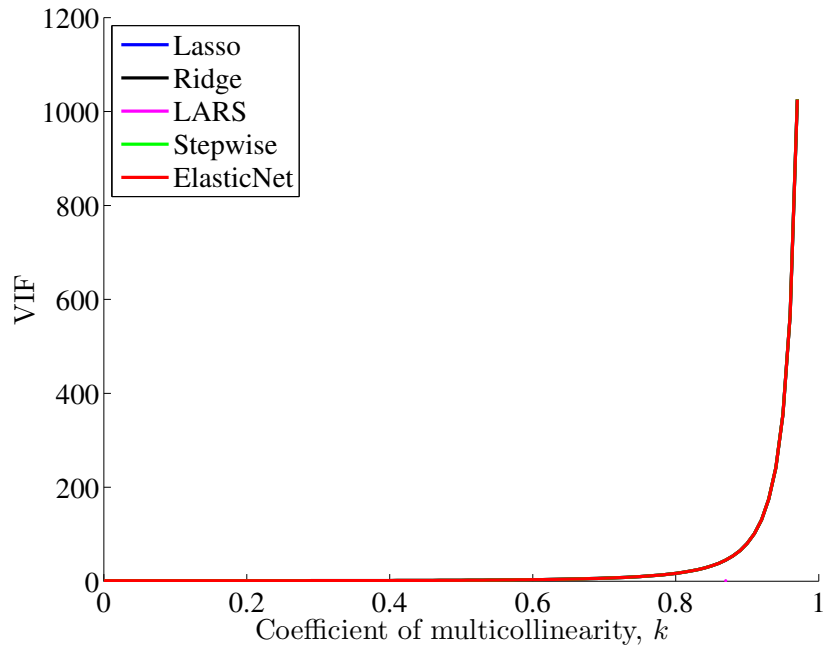


Рис. 5: Зависимость величины фактора инфляции дисперсии VIF от параметра мультиколлинеарности  $k$  для первого типа выборок

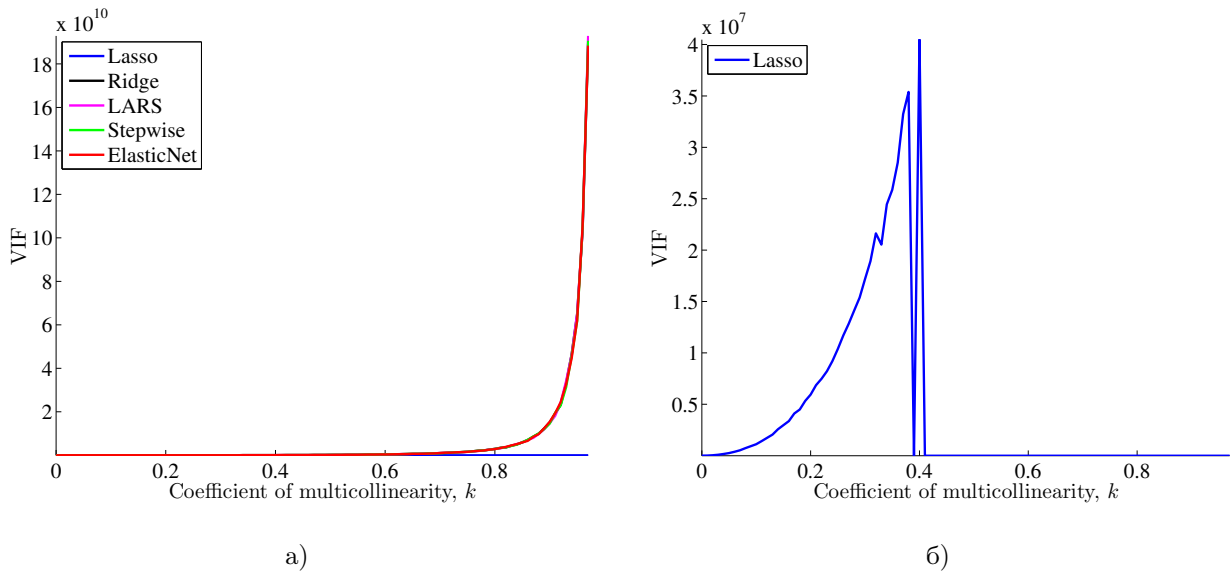


Рис. 6: Зависимость фактора инфляции дисперсии VIF от параметра мультиколлинеарности  $k$  для третьего типа выборок при работе: а) всех рассматриваемых методов отбора признаков, б) только Lasso

схожие со скачками у LARS, но меньшей амплитуды. Поэтому зависимости VIF от  $k$ , получаемые после использования методов Stepwise и Ridge, изображены на рис. 7 в) и 7 г). Для выборок четвёртого типа после применения метода Stepwise значения VIF

не превышают двух при росте коэффициента  $k$ . Это означает, что метод Stepwise для выборок четвёртого типа даёт набор признаков, в котором нет линейной зависимости между признаками.

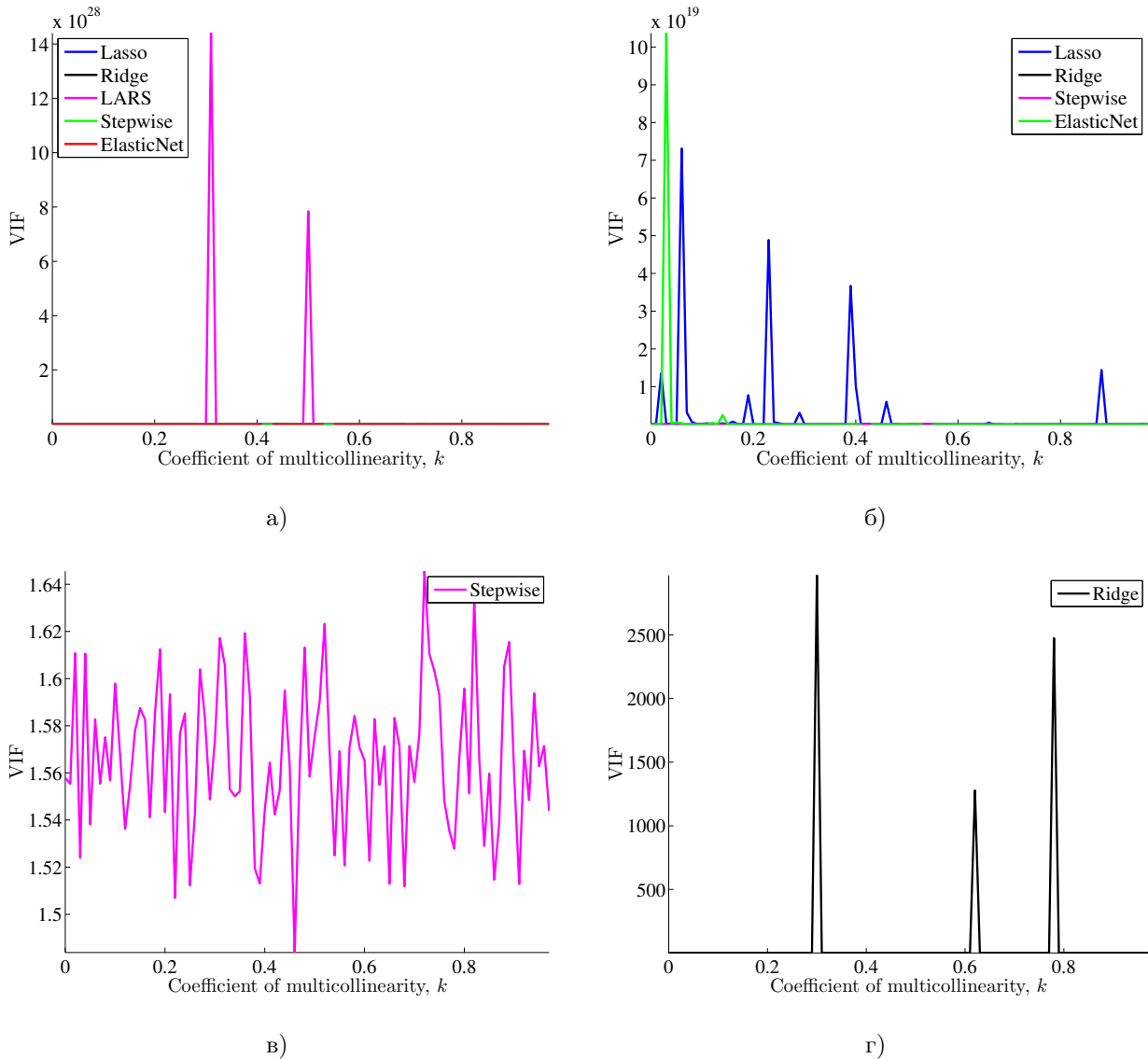


Рис. 7: Зависимость величины фактора инфляции дисперсии VIF от параметра мультиколлинеарности  $k$  для четвёртого типа выборок при работе: а) всех методов отбора признаков, б) всех методов кроме LARS, в) метода Stepwise, г) метода Ridge

Рассмотрим зависимость количества мультиколлинеарных признаков  $d$  в множестве отобранных признаков от значений предельной ошибки  $s_0$  для ранее рассмотренных типов выборок на рис. 8, 9, 10.

На рис. 8 показана зависимость количества лишних признаков  $d$  в множестве ото-

бранных признаков от предельного значения функции ошибки  $s_0$  для первого типа выборок при значениях  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$ . Величина  $d$  стабильно равна нулю из-за ортогональности целевого вектора и всех признаков вплоть до значений  $s_0$  близкими к единице. Далее идёт резкий скачок  $d$ , так как предельное значение функции ошибки выросло достаточно, чтобы удалить сразу почти все признаки.

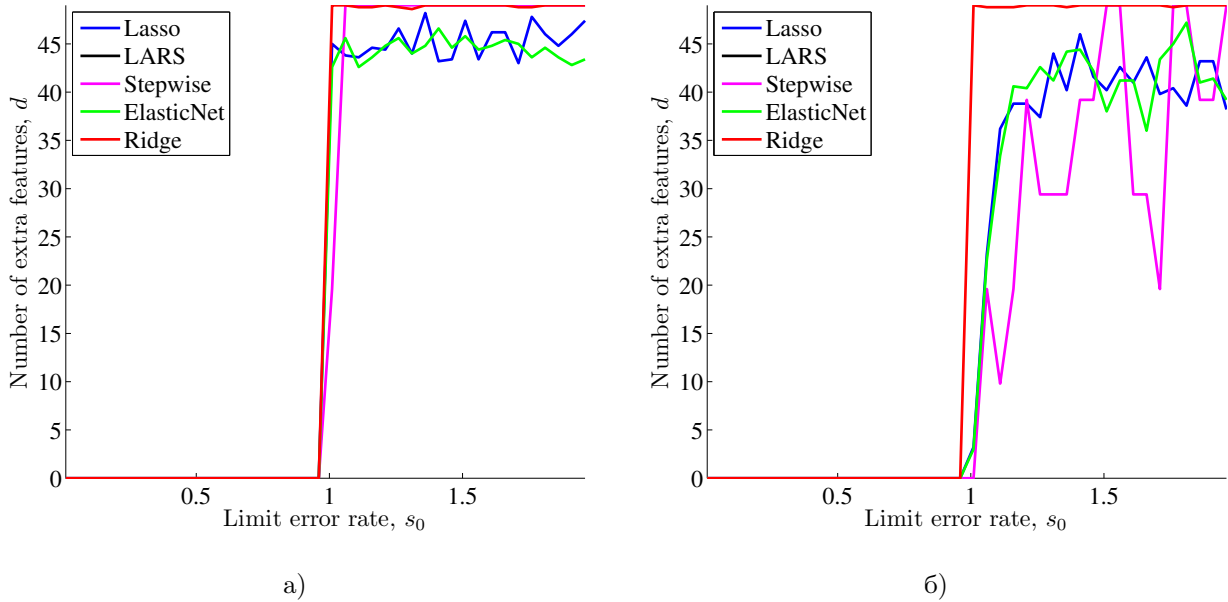


Рис. 8: Зависимость количества мультиколлинеарных признаков  $d$  в множестве отобранных признаков от предельного значения функции ошибки  $s_0$  для первого типа выборок при: а)  $k = 0.2$ , б)  $k = 0.8$

На рис. 9 показана зависимость величины  $d$  от параметра  $s_0$  для третьего типа выборок при значениях  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$ . Метод Lasso отбирает один или два признака, наилучшим образом приближающие целевой вектор, поэтому величина  $d$  для этого метода равна нулю или единице. Аналогично, но чуть хуже работает метод ElasticNet, он отбирает чуть больше лишних признаков нежели метод Lasso. Зависимость  $d$  от  $s_0$  для метода Ridge схожа с зависимостью для первого типа выборок по той же причине: сначала  $s_0$  достаточно велика, чтобы удалять хоть один признак, но как только  $s_0$  приближается к единице становится возможным удалить сразу почти все признаки. Для методов LARS и Sterwise наблюдается постепенный рост величины  $d$  с ростом предельного значения функции ошибки  $s_0$  с выходом на константу при достижении  $s_0$  значения близкого к единице.

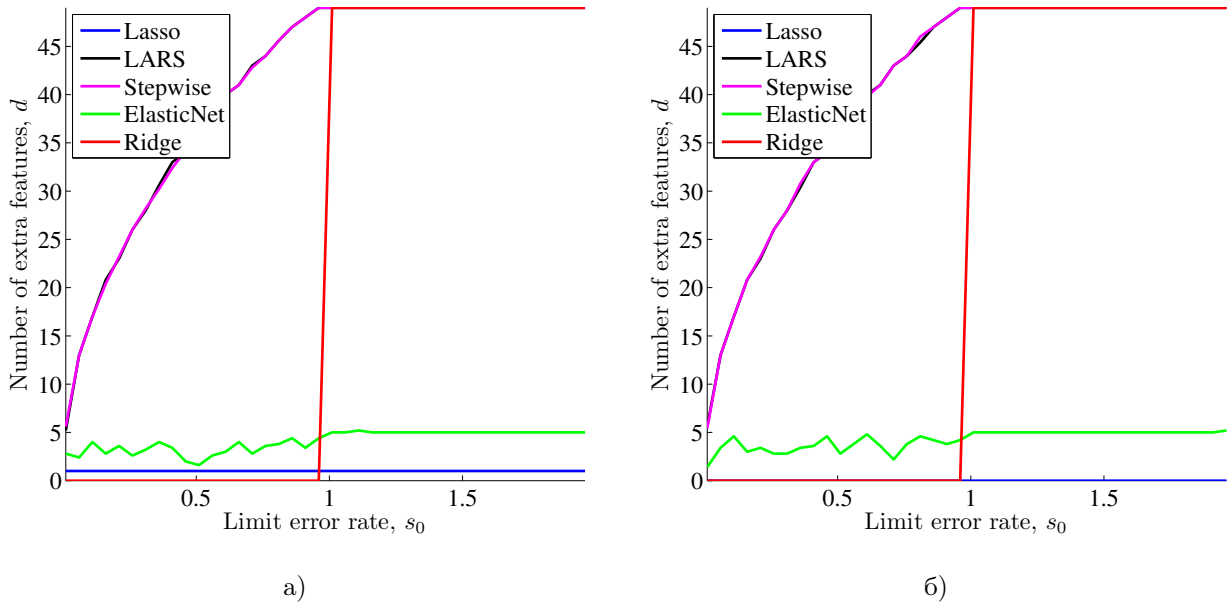


Рис. 9: Зависимость количества мультиколлинеарных признаков  $d$  в множестве отобранных признаков от предельного значения функции ошибки  $s_0$  для третьего типа выборок при: а)  $k = 0.2$ , б)  $k = 0.8$

На рис. 10 показана зависимость  $d$  от параметра  $s_0$  для четвёртого типа выборок при  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$ . Наиболее стабильные решения даёт метод Stepwise, у которого в среднем обнаруживается только один признак, удаление которого приводит к ошибке, не превышающей  $s_0$ . Чуть хуже работает метод LARS: количество лишних признаков  $d$  среди отобранных им не превышает пяти при росте предельного значения функции ошибки  $s_0$ . Для методов Lasso и ElasticNet наблюдается рост  $d$  при росте  $s_0$  до единицы, а затем стабилизация на уровне  $d \simeq 20$ . Для метода Ridge вид зависимости схож с предыдущими типами выборок, только для четвёртого типа после преодоления  $s_0$  значения равного единице величина  $d$  начала сильно колебаться. Это показывает неустойчивость набора признаков, получаемого методом Ridge для четвёртого типа выборок.

Далее рассмотрим пару значений — размерность вектора параметров  $\mathbf{w}^*$  после отбора признаков  $|\mathcal{A}|$  и логарифм числа обусловленности матрицы  $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$  — для каждого алгоритма и каждого типа выборок при  $k = 0.2$  и  $k = 0.8$ ; соответствующие графики приведены на рис. 11, 12 и 13.

На рис. 6 показано значение пары мощности множества отобранных признаков  $|\mathcal{A}|$  и логарифм числа обусловленности матрицы  $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$  для каждого значения параметра мультиколлинеарности  $k$  из отрезка  $[0, 0.97]$  с шагом 0.1.

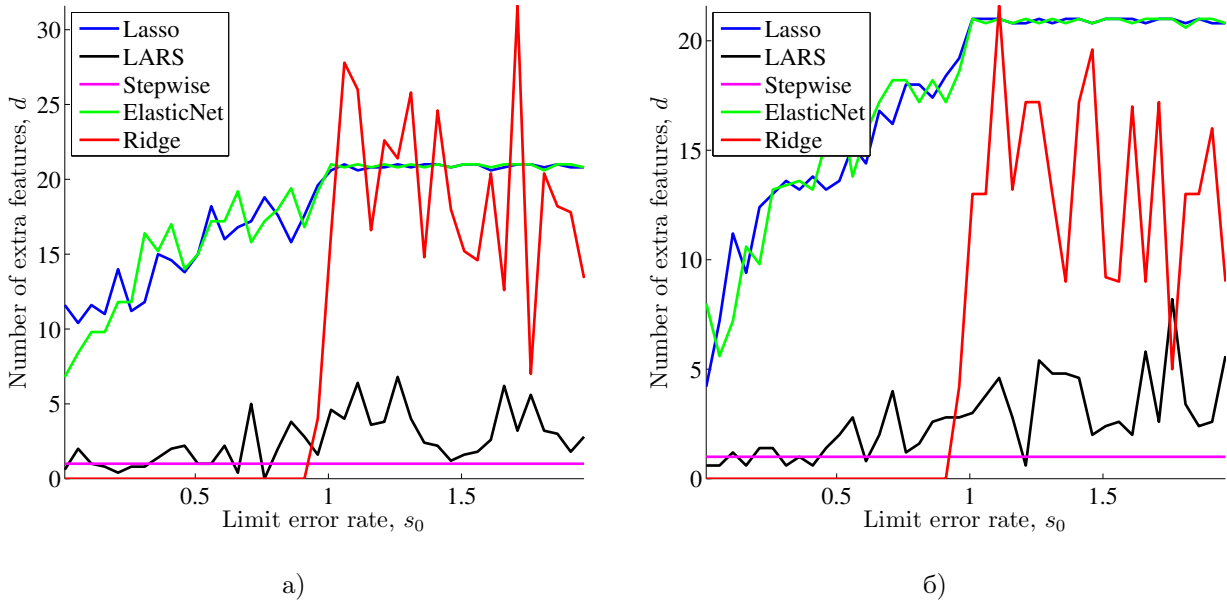


Рис. 10: Зависимость количества мультиколлинеарных признаков  $d$  в множестве отобранных признаков от предельного значения функции ошибки  $s_0$  для четвёртого типа выборок при: а)  $k = 0.2$ , б)  $k = 0.8$

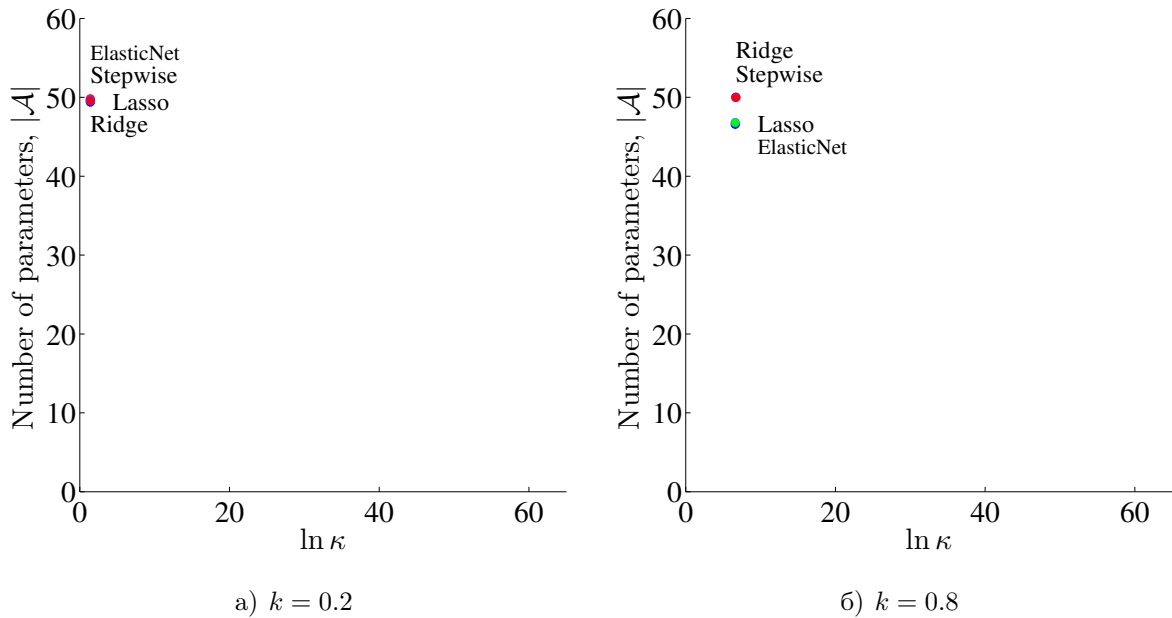


Рис. 11: Пары значений сложности и устойчивости для выборки первого типа при а)  $k = 0.8$ , б)  $k = 0.8$



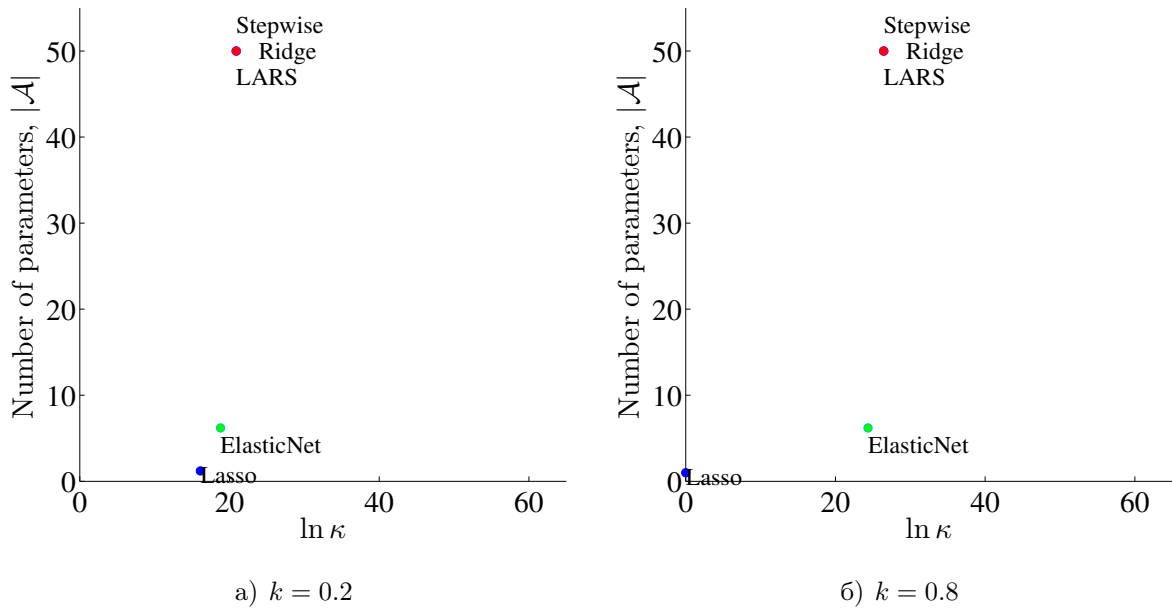


Рис. 12: Пары значений сложности и устойчивости для выборки третьего типа при а)  $k = 0.2$ , б)  $k = 0.8$

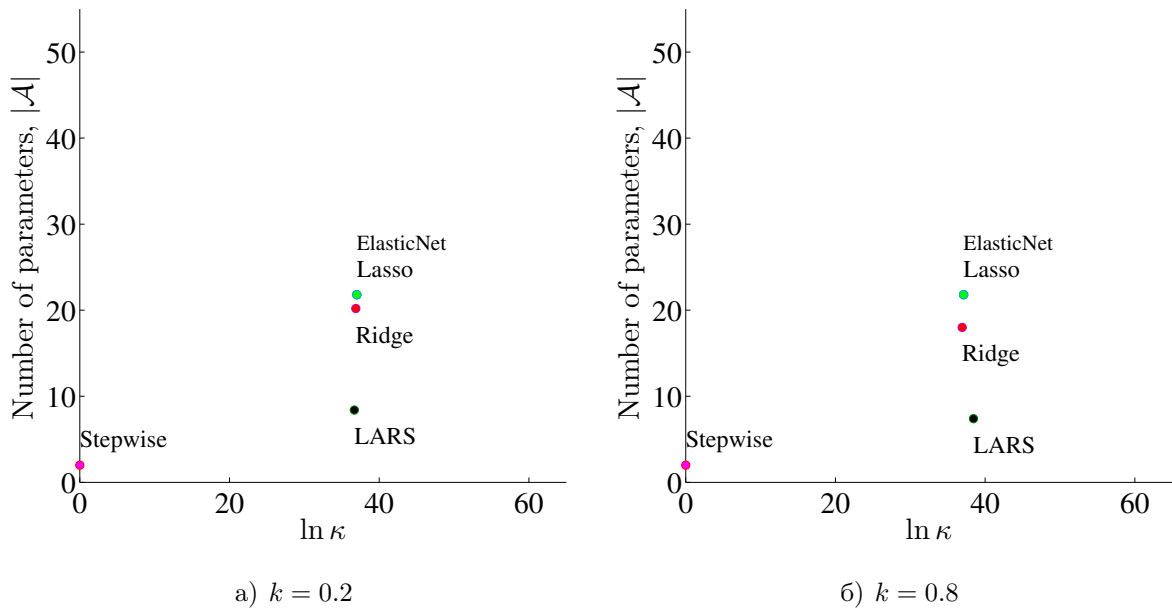
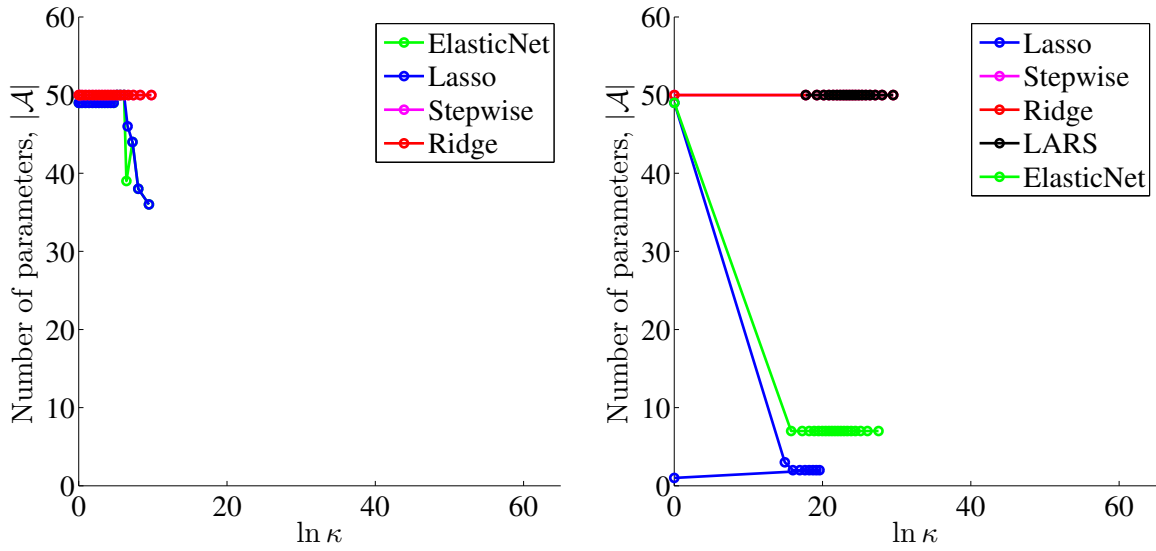


Рис. 13: Пары значений сложности и устойчивости для выборки четвёртого типа при а)  $k = 0.2$ , б)  $k = 0.8$

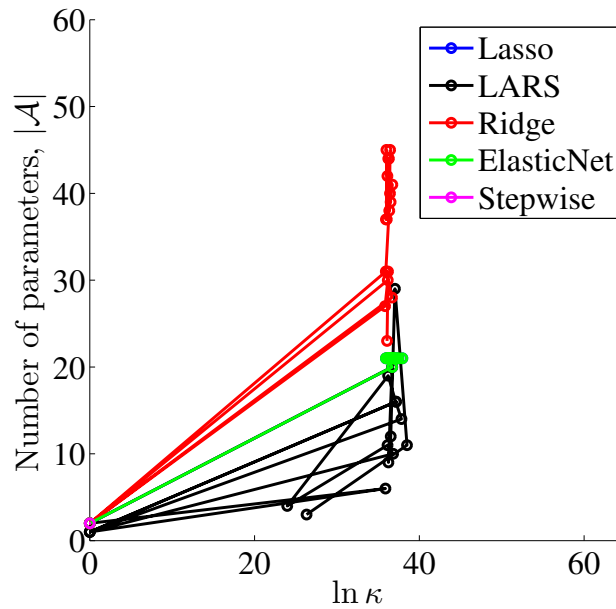
## 7 Заключение

В работе проведено исследование эффективности методов выбора признаков в случае выборок с мультиколлинеарными признаками. Эксперименты показали, что из рассмотренных методов проблему мультиколлинеарности при отборе признаков решают методы



а) Сложность и устойчивость моделей для рассматриваемых алгоритмов при изменении  $k = 0, \dots, 0.97$  для первого типа выборок

б) Сложность и устойчивость моделей для рассматриваемых алгоритмов при изменении  $k = 0, \dots, 0.97$  для третьего типа выборок



в) Сложность и устойчивость моделей для рассматриваемых алгоритмов при изменении  $k = 0, \dots, 0.97$  для четвёртого типа выборок

Рис. 14: Мощность множества отобранных признаков  $|\mathcal{A}|$  и логарифм числа обусловленности матрицы  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  для каждого типа выборок при изменении параметра мультиколлинеарности  $k$

Lasso (для выборок третьего типа) и Stepwise (для выборок четвёртого типа). Для выборок первого типа все рассмотренные методы показывают одинаковые результаты: ни один из рассматриваемых методов выбора признаков не решает проблему мультиколлинеарности в случае ортогональности всех признаков целевому вектору. Предложенный критерий показывает, что как при малых, так и при больших значениях  $k$  устойчивые решения дают одинаковые методы. Также вид зависимости между величинами  $s_0$  и  $d$  практически одинаков в рамках одной выборки для больших и маленьких значений  $k$ . Для выборок первого типа все рассматриваемые методы показывают одинаковый результат, для выборок третьего типа наиболее устойчивый результат даёт метод Lasso, для выборок четвёртого типа — методы LARS и Stepwise.

**План дальнейшей работы.** Ниже приведена постановка задачи определения оптимального метода выбора признаков  $\mathbf{m}^*$  по данной выборке  $\mathcal{D}$  и план вычислительного эксперимента.

Пусть дано множество выборок  $\mathcal{D}_{\mathcal{L}} = \{D_i = \{\mathbf{X}_i, \mathbf{y}_i\}\}_{i=1}^d$ , где  $\mathbf{X}_i$  — матрица размера  $m \times n$  и  $\mathbf{y}_i$  — вектор размера  $m \times 1$ , и множество методов выбора признаков  $\mathfrak{M} = \{\mathbf{m}_j\}_{j=1}^m$ . При этом множество прецедентов — это множество пар  $(D_i, \mathbf{m}_j)$ , образованных в соответствии с заданным внешним функционалом качества  $Q(\mathbf{m}|D)$ :

$$\mathbf{m}_j = \arg \min_{\mathbf{m} \in \mathfrak{M}} Q(\mathbf{m}|D_i).$$

Необходимо построить алгоритм  $a : D \rightarrow \mathbf{m}$  такой, что данной выборке  $D$  будет поставлен в соответствие некоторый метод выбора признаков  $\mathbf{m} \in \mathfrak{M}$ .

План экспериментов:

1. Создать множества  $D_i$ . Например, выборки 4 типов из предыдущей работы как базовые.
2. Для каждой  $D_i$  найти  $\mathbf{m}_j \in \mathfrak{M}$  согласно  $Q$ . Полным прогоном всех  $\mathbf{m}_j$  по всем  $D_i$ .
3. Задать алгоритм  $a$ : нейронная сеть,  $kNN$  (нужно расстояние между выборками!), другие классификаторы...
4. Настроить  $a$  по  $D_i$ .
5. Проверка качества на тестовых выборках  $\mathcal{D}_{\mathcal{L}}$ .

## Список литературы

- [1] *Askin R. G.* Multicollinearity in regression: Review and examples // *Journal of Forecasting*, 1982, vol. 1, no. 3, pp. 281-292.
- [2] *Leamer Edward E.* Multicollinearity: A Bayesian Interpretation // *The Review of Economics and Statistics*, 1973, vol. 55, no. 3, pp. 371-80.
- [3] *Belsley David A, Kuh Edwin, Welsch Roy E.* Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity. — New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [4] *Yu Lei, Liu Huan.* Feature selection for high-dimensional data: A fast correlation-based filter solution // *ICML*. — Washington D.C.: AAAI Press, 2003, vol. 3, pp. 856-863.
- [5] *Chen Yi-Wei, Lin Chih-Jen.* Combining SVMs with various feature selection strategies / В кн. *Feature Extraction. Foundations and Applications*. Под ред. Isabelle Guyon. — Berlin: Springer, 2006, pp. 315-324.
- [6] *George H John, Ron Kohavi, Karl Pfleger et al.* Irrelevant Features and the Subset Selection Problem // *ICML*. — New Brunswick: Morgan Kaufmann, 1994, vol. 94, pp. 121-129.
- [7] *Chong Il-Gyo, Jun Chi-Hyuck.* Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2005, vol. 78, no. 1-2, pp. 103-112.
- [8] *Guyon Isabelle, Elisseeff André.* An Introduction to Variable and Feature Selection // *The Journal of Machine Learning Research*, 2003, vol. 3, pp. 1157-1182.
- [9] *Bolón-Canedo Verónica, Sánchez-Marroño Noelia, Alonso-Betanzos Amparo.* A review of feature selection methods on synthetic data // *Knowledge and information systems*, 2013, vol. 34, no. 3, pp. 483-519.
- [10] *Ladha L, Deepa T.* Feature selection methods and algorithms. // *International Journal on Computer Science & Engineering*, 2011, vol. 3, no. 5.
- [11] *El-Dereny M., Rashwan N. I.* Solving multicollinearity problem using ridge regression models // *Int. Journal of Contemp. Math. Sciences*, 2011, vol. 6, pp. 585-600.

- [12] *Tibshirani Robert*. Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso // Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 1994, vol. 58, pp. 267-288.
- [13] *Efron B., Hastie T., Tibshirani R.* Least angle regression // The Annals of Statistics, 2004, vol. 32, no. 2, pp. 407-499.
- [14] *Zou Hui, Hastie Trevor*. Regularization and variable selection via the Elastic Net // Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 2005, vol. 67, pp. 301-320.
- [15] *Harrell F. E.* Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis. — Berlin: Springer, 2001.
- [16] *Paul R. K.* Multicollinearity: Causes, Effects and Remedies. — Working paper, unknown date. Accessed Apr. 23, 2013, Internet address: <http://bit.ly/1qDH0bV>.
- [17] *Vadim Strijov, Ekaterina Krymova, Gerhard-Wilhelm Weber*. Evidence optimization for consequently generated models // Mathematical and Computer Modelling, 2013, vol. 57, no. 1-2, pp. 50-56.