

УДК 332.14
ББК 65.054
X15

Рон Хайндман и Джордж Атанасопулос

X15 Прогнозирование: принципы и практика / пер. с англ. А. В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 458 с.: ил.

ISBN 978-5-93700-151-1

Данная книга представляет собой всестороннее введение в методы прогнозирования и содержит достаточно информации о каждом из них, помогая читателям разумно их использовать. Примеры с многочисленными наборами данных на языке R авторы заимствовали из собственного опыта консультирования. В конце глав приводятся упражнения по пройденной теме.

Издание адресовано специалистам, занимающимся прогнозированием в бизнесе, науке, на производстве, а также может быть полезно студентам и преподавателям.

УДК 332.14
ББК 65.054

Copyright Forecasting: Principles and Practice, ISBN 9780987507136, published by OTexts.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN (англ.) 978-0-98750-713-6
ISBN (рус.) 978-5-93700-151-1

Copyright © 2020 by Rob J Hyndman and George Athanasopoulos
© Оформление, издание, перевод, ДМК Пресс, 2023

Оглавление

Предисловие от издательства	16
Об авторах	17
Предисловие.....	18

Глава 1. Приступая к работе 21

1.1 Что можно прогнозировать?	22
1.2 Прогнозирование, цели и планирование.....	23
Прогнозирование	24
Цели	24
Планирование	24
Краткосрочные прогнозы	24
Среднесрочные прогнозы.....	24
Долгосрочные прогнозы	24
1.3 Определение того, что следует прогнозировать.....	24
1.4 Данные и методы прогнозирования	25
Прогнозирование временных рядов.....	26
Индикаторные переменные и прогнозирование временных рядов	27
1.5 Несколько тематических исследований.....	28
Случай 1.....	28
Случай 2.....	29
Случай 3.....	29
Случай 4.....	30
1.6 Базовые шаги в задаче прогнозирования	30
Шаг 1: определение задачи	30
Шаг 2: сбор информации	30
Шаг 3: предварительный (разведывательный) анализ	30
Шаг 4: выбор и подгонка моделей.....	31
Шаг 5: использование и оценивание модели прогнозирования	31
1.7 Перспектива статистического прогнозирования	31
1.8 Упражнения	33
1.9 Дальнейшее чтение	34
Библиография	34

Глава 2. Графика временных рядов 35

2.1 Объекты twibble	35
Переменная-индекс	35
Переменные-ключи	37
Работа с объектами twibble.....	38
Прочитать csv-файл и конвертировать его в twibble	41
Сезонный период	42
2.2 Графики времени	43

2.3 Закономерности временных рядов	45
Тренд	45
Сезонный	45
Циклический.....	46
2.4 Сезонные графики	47
Несколько сезонных периодов	48
2.5 Графики сезонных подрядов.....	50
Пример: туристический отдых в Австралии.....	50
2.6 Диаграммы рассеяния	54
Корреляция	56
Матрицы диаграмм рассеяния	57
Библиография	60
2.7 Графики лагов	60
2.8 Автокорреляция	61
Тренды и сезонность на ACF-графиках	63
2.9 Белый шум.....	63
2.10 Упражнения	65
2.11 Дальнейшее чтение	67
Библиография	68

Глава 3. Разложение временных рядов 69

3.1 Преобразования и корректировки	69
Календарные корректировки	69
Корректировки по численности населения.....	70
Корректировки на инфляцию.....	71
Математические преобразования.....	72
Библиография	74
3.2 Компоненты временных рядов.....	75
Пример: занятость в секторе розничной торговли США.....	75
Сезонно скорректированные данные	79
3.3 Скользящие средние.....	80
Сглаживание скользящей средней	80
Скользящие средние скользящих средних.....	83
Оценивание тренда-цикла с сезонными данными	85
Пример: занятость в секторе розничной торговли США.....	85
Взвешенные скользящие средние	86
3.4 Классическое разложение	87
Аддитивное разложение	87
Мультипликативное разложение	88
Комментарии к классическому разложению	89
3.5 Методы, используемые официальными статистическими агентствами	89
Метод X-11	90
Метод SEATS.....	93
Библиография	94
3.6 STL-разложение	95
Библиография	97
3.7 Упражнения.....	97

3.8 Дальнейшее чтение	100
Библиография	100
Глава 4. Признаки временных рядов	101
4.1 Несколько простых статистик.....	101
4.2 Признаки ACF	102
4.3 Признаки STL	104
4.4 Другие признаки.....	107
4.5 Разведывательный анализ данных о туризме в Австралии.....	108
Библиография	114
4.6 Упражнения	114
4.7 Дальнейшее чтение	114
Библиография	114
Глава 5. Инструментарий прогнозиста	115
5.1 Чистый рабочий поток прогнозирования.....	115
Подготовка данных (очистка)	115
Построение графика данных (визуализация)	116
Определение модели (формулирование)	116
Тренировка модели (вычисление)	117
Проверка результативности модели (оценивание)	118
Генерирование прогнозов (прогнозирование)	118
5.2 Несколько простых методов прогнозирования.....	119
Средне-арифметический метод	120
Наивный метод.....	120
Сезонный наивный метод	121
Дрейфовый метод.....	122
Пример: ежеквартальное производство пива в Австралии.....	123
Пример: ежедневная цена акций Google на момент закрытия торгового периода	124
5.3 Подогнанные значения и остатки	125
Подогнанные значения.....	125
Остатки.....	126
5.4 Диагностика остатков.....	127
Пример: прогнозирование цен акций Google на момент закрытия торгового периода	128
Тесты портманто на автокорреляцию	131
5.5 Распределительные прогнозы и предсказательные интервалы	133
Прогнозные распределения.....	133
Предсказательные интервалы	134
Одношаговые предсказательные интервалы	135
Многошаговые предсказательные интервалы	135
Эталонные методы	135
Предсказательные интервалы из бутстрапированных остатков	137
5.6 Прогнозирование с использованием преобразований.....	142
Предсказательные интервалы с преобразованиями	142
Поправки на смещение	142

5.7 Прогнозирование с разложением.....	144
Пример: занятость в секторе розничной торговли США.....	145
5.8 Оценивание точности точечного прогноза	147
Тренировочный и тестовый наборы	147
Функции для взятия подмножеств из временных рядов	148
Ошибки прогнозов	149
Ошибки, зависящие от шкалы	149
Процентные ошибки	149
Шкалированные ошибки.....	150
Примеры	151
Библиография	154
5.9 Оценивание точности распределительного прогноза	154
Квантильные баллы.....	154
Балл Винклера.....	155
Непрерывный рангово-вероятностный балл	156
Бесшкальные сравнения с использованием баллов навыков	157
Библиография	158
5.10 Перекрестная валидация временных рядов	158
Пример: точность прогнозного горизонта с помощью	
перекрестной валидации	161
5.11 Упражнения	162
5.12 Дальнейшее чтение	165
Библиография	165

Глава 6. Прогнозы на основе суждений 166

Библиография	167
6.1 Остерегайтесь ограничений.....	167
Библиография	168
6.2 Ключевые принципы	168
Четко и кратко формулировать задачу прогнозирования	168
Внедрять систематический подход.....	168
Документировать и обосновывать	169
Систематически оценивать прогнозы	169
Сегрегировать прогнозистов и пользователей	169
Пример: схема фармацевтических льгот (PBS)	170
6.3 Дельфийский метод.....	172
Эксперты и анонимность	173
Постановка задачи прогнозирования в дельфийском методе.....	173
Обратная связь.....	174
Итерация	174
Окончательные прогнозы	174
Ограничения и вариации.....	174
Куратор	174
Библиография	175
6.4 Прогнозирование по аналогии	175
Пример: разработка учебной программы средней школы	175
Структурированная аналогия	176

Библиография	176
6.5 Сценарное прогнозирование	177
6.6 Прогнозирование новых продуктов	177
Композитный прогноз торгового отдела	177
Мнение руководства	178
Намерения клиентов	178
Библиография	179
6.7 Сужденческие корректировки	179
Использовать корректировки экономно	179
Применять структурированный подход	180
Пример: комитет по прогнозированию туризма (TFC)	180
Библиография	181
6.8 Дальнейшее чтение	182
Библиография	182

Глава 7. Модели регрессии временных рядов184

7.1 Линейная модель.....	184
Простая линейная регрессия	184
Пример: потребительские расходы в США	185
Множественная линейная регрессия	188
Пример: потребительские расходы в США	188
Допущения	190
7.2 Оценивание методом наименьших квадратов	191
Пример: потребительские расходы в США	191
Подогнанные значения	192
Качество подгонки	194
Пример: потребительские расходы в США	195
Стандартная ошибка регрессии	195
7.3 Оценивание регрессионной модели	195
График ACF остатков	196
Гистограмма остатков	196
Графики остатков в сопоставлении с предсказателями	197
Графики остатков в сопоставлении с подогнанными значениями	198
Выбросы и влиятельные наблюдения	199
Мнимая регрессия	200
7.4 Несколько полезных предсказателей	202
Тренд	202
Фиктивные переменные	203
Сезонные фиктивные переменные	203
Пример: ежеквартальное производство пива в Австралии	204
Переменные вмешательства	207
Торговые дни	207
Распределенные лаги	208
Пасха	208
Ряд Фурье	208
7.5 Отбор предсказателей	209
Скорректированный R^2	210

Перекрестная валидация	211
Информационный критерий Акаике	211
Исправленный информационный критерий Акаике	212
Байесов информационный критерий Шварца	212
Какую меру мы должны использовать?	212
Пример: потребление в США	213
Регрессия наилучшего подмножества	214
Пошаговая регрессия	214
Остерегайтесь статистического вывода после отбора предсказателей	215
Библиография	215
7.6 Прогнозирование с помощью регрессии	215
Антефактумные прогнозы в сопоставлении с постфактумными прогнозами	215
Пример: ежеквартальное производство пива в Австралии	216
Прогнозирование на основе сценариев	217
Строительство предсказательной регрессионной модели	218
Предсказательные интервалы	219
7.7 Нелинейная регрессия	221
Прогнозирование с нелинейным трендом	222
Пример: времена побед в Бостонском марафоне	222
7.8 Корреляция, каузация и прогнозирование	225
Корреляция – это не каузация	225
Прогнозирование с использованием коррелированных предсказателей	226
Мультиколлинеарность и прогнозирование	226
7.9 Матричная формулировка	227
Оценивание методом наименьших квадратов	228
Подогнанные значения и перекрестная валидация	228
Прогнозы и предсказательные интервалы	229
7.10 Упражнения	229
7.11 Дальнейшее чтение	232
Библиография	233

Глава 8. Экспоненциальное сглаживание 234

Библиография	234
8.1 Простое экспоненциальное сглаживание	235
Средневзвешенная форма	237
Компонентная форма	238
Плоские прогнозы	238
Оптимизация	239
Пример: экспорт из Алжира	239
8.2 Методы с трендом	241
Метод линейного тренда Хольта	241
Пример: население Австралии	242
Методы демпфируемого тренда	244
Пример: численность населения Австралии (продолжение)	245

Пример: используемость интернета	246
Библиография	248
8.3 Методы с сезонностью	249
Аддитивный метод Хольта–Винтерса	249
Мультипликативный метод Хольта–Винтерса	250
Пример: внутренние поездки с ночевкой в Австралии	250
Демпфирующий метод Хольта–Винтерса	254
Пример: метод Хольта–Винтерса с ежедневными данными	255
Библиография	255
8.4 Таксономия методов экспоненциального сглаживания	256
Библиография	257
8.5. Модели пространства состояний инноваций для экспоненциального сглаживания	257
ETS(A,N,N): простое экспоненциальное сглаживание с аддитивными ошибками	258
ETS(M,N,N): простое экспоненциальное сглаживание с мультипликативными ошибками	259
ETS(A,A, N): линейный метод Хольта с аддитивными ошибками	260
ETS(M,A, N): линейный метод Хольта с мультипликативными ошибками	260
Другие модели ETS	261
8.6 Оценивание и отбор модели	261
Оценивание моделей ETS	261
Отбор модели	262
Пример: гостевые ночи праздничных туристов в Австралии	263
Библиография	265
8.7 Прогнозирование с использованием моделей ETS	265
Предсказательные интервалы	266
Библиография	267
8.8 Упражнения	268
8.9 Дальнейшее чтение	271
Библиография	271

Глава 9. Модели ARIMA 272

9.1 Стационарность и дифференцирование	272
Дифференцирование	274
Модель случайного блуждания	275
Дифференцирование второго порядка	276
Сезонное дифференцирование	276
Тесты на единичные корни	279
Библиография	281
9.2 Нотация обратного сдвига	281
9.3 Авторегрессионные модели	282
9.4 Модели скользящих средних	283
9.5 Несезонные модели ARIMA	285
Пример: экспорт из Египта	286

Понимание моделей ARIMA	288
Графики ACF и PACF	288
9.6 Оценивание и выбор порядка	291
Оценивание максимального правдоподобия	291
Информационные критерии	291
9.7 Моделирование ARIMA в fable	292
Как работает функция ARIMA()?	292
Процедура моделирования	294
Пример: экспорт из Центральноафриканской Республики	296
Понимание констант в R	300
Построение графика характеристических корней	300
Библиография	301
9.8 Прогнозирование	301
Точечные прогнозы	301
Предсказательные интервалы	303
Библиография	304
9.9 Сезонные модели ARIMA	304
ACF/PACF	304
Пример: ежемесячная занятость в сфере досуга и гостиничного бизнеса в США	305
Пример: продажа кортикостероидных препаратов в Австралии	309
Оценивание на тестовом наборе	313
9.10 ARIMA в сопоставлении с ETS	314
Сравнение ARIMA() и ETS() на несезонных данных	316
Сравнение ARIMA() и ETS() на сезонных данных	317
9.11 Упражнения	321
9.12 Дальнейшее чтение	325
Библиография	326

Глава 10. Модели на основе динамической регрессии 327

10.1 Оценивание	328
Библиография	329
10.2 Регрессия с ошибками ARIMA с использованием fable	329
Пример: личное потребление и доход в США	330
10.3 Прогнозирование	333
Пример: личное потребление и доход в США	333
Пример: прогнозирование спроса на электроэнергию	334
10.4 Стохастические и детерминированные тренды	339
Пример: пассажиры воздушного транспорта Австралии	339
10.5 Динамическая гармоническая регрессия	342
Пример: расходы австралийцев на питание вне дома	343
Библиография	344
10.6 Лагированные предсказатели	344
Пример: телевизионная реклама и страховые котировки	345
10.7 Упражнения	348
10.8 Дальнейшее чтение	351
Библиография	351

Глава 11. Прогнозирование иерархических и сгруппированных временных рядов 352

11.1 Иерархические и сгруппированные временные ряды.....	353
Иерархические временные ряды	353
Пример: иерархия туризма в Австралии	354
Сгруппированные временные ряды	358
Пример: тюремное население Австралии	359
Смешанная иерархическая и групповая структура	362
11.2 Одноуровневые подходы.....	364
Подход «снизу вверх»	364
Пример: генерирование восходящих прогнозов	364
Рабочий поток прогнозирования агрегационных структур.....	366
Подходы «сверху вниз»	366
Средние исторические пропорции	366
Пропорции исторических средних	367
Прогнозные пропорции	367
Подход «от середины наружу»	369
Библиография	369
11.3 Увязывание прогнозов	369
Матричная нотация.....	369
Отображающие матрицы.....	370
Увязывание	371
Метод оптимальной увязки MinT.....	372
Библиография	374
11.4 Прогнозирование внутреннего туризма в Австралии	374
11.5 Увязанные распределительные прогнозы	377
Библиография	378
11.6 Прогнозирование тюремного населения Австралии	378
Библиография	383
11.7 Упражнения	383
11.8 Дальнейшее чтение	384
Библиография	384

Глава 12. Продвинутое методы прогнозирования 386

12.1 Сложная сезонность.....	386
STL с несколькими сезонными периодами	387
Динамическая гармоническая регрессия с несколькими сезонными периодами.....	390
Пример: спрос на электроэнергию	392
Библиография	395
12.2 Модель Prophet.....	396
Пример: ежеквартальное производство цемента	396
Пример: получасовой спрос на электроэнергию	398
Библиография	400
12.3 Векторные авторегрессии	400
Пример: модель VAR для прогнозирования потребления в США.....	403
Библиография	405

12.4 Нейросетевые модели.....	405
Архитектура нейронной сети	405
Нейросетевая авторегрессия	407
Пример: пятна на Солнце	407
Предсказательные интервалы.....	408
12.5 Бутстрапирование и бутстрап-агрегирование	410
Бутстрапирование временного ряда.....	410
Бутстрап-агрегированные прогнозы	412
Библиография	414
12.6 Упражнения	415
12.7 Дальнейшее чтение	415
Библиография	415

Глава 13. Некоторые практические вопросы

прогнозирования 417

13.1 Еже недельные, ежедневные и субдневные данные	417
Еженедельные данные	417
Ежедневные и субдневные данные	419
13.2 Временные ряды счетных данных.....	420
Пример: продажа фармацевтических препаратов	421
Библиография	423
13.3 Обеспечение того, чтобы прогнозы оставались в пределах допустимых значений.....	424
Положительные прогнозы	424
Прогнозы, ограниченные интервалом	425
13.4 Комбинации прогнозов	427
Прогнозные распределения комбинаций	429
Библиография	431
13.5 Предсказательные интервалы для агрегатов.....	431
13.6 Ретрополяция	432
13.7 Очень длинные и очень короткие временные ряды	433
Прогнозирование очень коротких временных рядов.....	433
Прогнозирование очень длинных временных рядов	435
13.8 Прогнозирование на тренировочном и тестовом наборах.....	435
Многошаговые прогнозы на тренировочных данных	436
Одношаговые прогнозы на тестовых данных	437
13.9 Работа с выбросами и пропущенными значениями.....	438
Выбросы	438
Пропущенные значения	441
13.10 Дальнейшее чтение.....	443
Библиография	443

Приложение А. Использование языка R 444

Инсталлирование R и RStudio.....	444
Примеры на R в этой книге.....	444
Начало работы с R.....	445

Приложение В. Для преподавателей.....	446
Решения упражнений.....	446
Слайды.....	446
Приложение С. Рецензии и отзывы	447
Отзывы коллег-преподавателей.....	447
Отзывы практикующих специалистов и студентов.....	448
Библиография	450