

УДК 004.4'422LLVM

ББК 32.973.33

Л77

**Лопес, Бруно Кардос.**

Л77 LLVM: инфраструктура для разработки компиляторов. Знакомство с основами LLVM и использование базовых библиотек для создания продвинутых инструментов / Б. К. Лопес, Р. Аулер ; пер. с англ. А. Н. Киселёва. — 2-е изд., эл. — 1 файл pdf : 343 с. — Москва : ДМК Пресс, 2023. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-603-6

LLVM — новейший фреймворк для разработки компиляторов. Благодаря простоте расширения и организации в виде множества библиотек, LLVM легко поддается освоению даже начинающими программистами, вопреки устоявшемуся мнению о сложности разработки компиляторов.

Сначала эта книга покажет, как настроить, собрать и установить библиотеки, инструменты и внешние проекты LLVM. Затем познакомит с архитектурой LLVM и особенностями работы всех компонентов компилятора: анализатора исходных текстов, генератора кода промежуточного представления, генератора выполняемого кода, механизма JIT-компиляции, возможностями кросс-компиляции и интерфейсом расширений. На множестве наглядных примеров и фрагментов исходного кода книга поможет вам войти в мир разработки компиляторов на основе LLVM.

Издание предназначено энтузиастам, студентам, а также разработчикам компиляторов, интересующимся LLVM. Читатели должны знать язык программирования C++ и, желательно, иметь некоторые представления о теории компиляции.

УДК 004.4'422LLVM

ББК 32.973.33

**Электронное издание на основе печатного издания:** LLVM: инфраструктура для разработки компиляторов. Знакомство с основами LLVM и использование базовых библиотек для создания продвинутых инструментов / Б. К. Лопес, Р. Аулер ; пер. с англ. А. Н. Киселёва. — Москва : ДМК Пресс, 2015. — 342 с. — ISBN 978-5-97060-305-5. — Текст : непосредственный.

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.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-603-6

© 2014 Packt Publishing

© Оформление, перевод на русский язык,  
ДМК Пресс, 2015



# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Об авторах .....</b>	<b>11</b>
<b>О рецензентах.....</b>	<b>12</b>
<b>Предисловие .....</b>	<b>14</b>
Содержание книги.....	17
Что потребуется для работы с книгой .....	19
Кому адресована эта книга.....	19
Типографские соглашения .....	20
Отзывы и пожелания .....	21
Скачивание исходного кода примеров .....	21
Список опечаток.....	22
Нарушение авторских прав .....	22
<b>Глава 1. Сборка и установка LLVM .....</b>	<b>23</b>
Порядок нумерации версий LLVM.....	24
Установка скомпилированных пакетов LLVM .....	25
Установка скомпилированных пакетов с официального сайта.....	25
Установка с использованием диспетчера пакетов.....	27
Сборка из исходных текстов .....	28
Системные требования.....	28
Получение исходных текстов.....	29
Сборка и установка LLVM .....	30
Windows и Microsoft Visual Studio .....	37
Mac OS X и Xcode .....	41
В заключение .....	45
<b>Глава 2. Внешние проекты.....</b>	<b>47</b>
Введение в дополнительные инструменты Clang.....	47
Сборка и установка дополнительных инструментов Clang .....	49
Compiler-RT .....	50
Compiler-RT в действии.....	51
Расширение DragonEgg.....	52
Сборка DragonEgg .....	53

Конвейер компиляции с применением DragonEgg и инструментов LLVM .....	54
Пакет тестов LLVM .....	56
Использование LLDB.....	57
Введение в стандартную библиотеку libc++ .....	59
В заключение .....	63
<b>Глава 3. Инструменты и организация .....</b>	<b>64</b>
Введение в основные принципы организации LLVM .....	64
LLVM сегодня .....	67
Взаимодействие с драйвером компилятора.....	71
Использование автономных инструментов.....	72
Внутренняя организация LLVM .....	75
Основные библиотеки LLVM.....	76
Приемы программирования на C++ в LLVM .....	78
Эффективные приемы программирования на C++ в LLVM.....	80
Демонстрация расширяемого интерфейса проходов.....	83
Реализация первого собственного проекта LLVM .....	84
Makefile.....	85
Реализация.....	87
Общие советы по навигации в исходных текстах LLVM .....	89
Читайте код как документацию .....	89
Обращайтесь за помощью к сообществу .....	90
Знакомьтесь с обновлениями – читайте журнал изменений в SVN как документацию .....	90
Заключительные замечания.....	93
В заключение .....	93
<b>Глава 4. Анализатор исходного кода .....</b>	<b>94</b>
Введение в Clang.....	94
Работа анализатора исходного кода .....	95
Библиотеки.....	97
Диагностика в Clang.....	100
Этапы работы анализатора Clang .....	105
Лексический анализ.....	105
Синтаксический анализ .....	112
Семантический анализ.....	119
Все вместе.....	122
В заключение .....	126
<b>Глава 5. Промежуточное представление LLVM .....</b>	<b>127</b>
Обзор.....	127
Зависимость LLVM IR от целевой архитектуры .....	130

Основные инструменты для работы с форматами IR .....	131
Введение в синтаксис языка LLVM IR .....	132
Представление LLVM IR в памяти .....	136
Реализация собственного генератора LLVM IR .....	139
Сборка и запуск генератора IR .....	143
Как генерировать любые конструкции IR с использованием генератора кода C++ .....	144
Оптимизация на уровне IR .....	145
Оптимизация времени компиляции и времени компоновки .....	145
Определение проходов, имеющих значение .....	147
Зависимости между проходами .....	149
Прикладной интерфейс проходов .....	151
Реализация собственного прохода .....	152
В заключение .....	157
<b>Глава 6. Генератор выполняемого кода.....</b>	<b>158</b>
Обзор .....	158
Инструменты генераторов кода .....	161
Структура генератора кода .....	162
Библиотеки генераторов кода .....	163
Язык TableGen .....	165
Язык .....	167
Использование файлов .td с генераторами кода .....	168
Этап выбора инструкций .....	174
Класс SelectionDAG .....	175
Упрощение .....	178
Объединение DAG и легализация .....	179
Выбор инструкций с преобразованием «DAG-to-DAG» .....	181
Визуализация процесса выбора инструкций .....	184
Быстрый выбор инструкций .....	185
Планирование инструкций .....	186
Маршруты инструкций .....	186
Определение опасностей .....	188
Единицы планирования .....	188
Машинные инструкции .....	188
Распределение регистров .....	189
Объединение регистров .....	191
Замена виртуальных регистров .....	196
Архитектурно-зависимые обработчики .....	197
Пролог и эпилог .....	198
Индексы кадров стека .....	199
Инфраструктура машинного кода .....	199

Инструкции MC .....	200
Эмиссия кода .....	200
Реализация собственного прохода для генератора кода .....	203
В заключение .....	206
<b>Глава 7. Динамический компилятор .....</b>	<b>208</b>
Основа механизма динамической компиляции в LLVM .....	209
Введение в механизм выполнения .....	210
Управление памятью .....	212
Введение в инфраструктуру llvm::JIT .....	213
Запись блоков двоичного кода в память .....	213
JITMemoryManager .....	214
Механизмы вывода целевого кода .....	214
Информация о целевой архитектуре .....	215
Практика применения класса JIT .....	217
Введение в инфраструктуру llvm::MCJIT .....	222
Механизм MCJIT .....	223
Как MCJIT компилирует модули .....	224
Диспетчер памяти .....	227
Использование механизма MCJIT .....	228
Инструменты компиляции LLVM JIT .....	231
Инструмент lli .....	231
Инструмент llvm-rtld .....	232
Дополнительные ресурсы .....	233
В заключение .....	234
<b>Глава 8. Кросс-платформенная компиляция .....</b>	<b>235</b>
Сравнение GCC и LLVM .....	236
Триады определения целевой архитектуры .....	238
Подготовка инструментария .....	240
Стандартные библиотеки C и C++ .....	240
Библиотеки времени выполнения .....	241
Ассемблер и компоновщик .....	242
Анализатор исходного кода Clang .....	242
Кросс-компиляция с аргументами командной строки Clang .....	244
Параметры драйвера, определяющие архитектуру .....	244
Зависимости .....	245
Кросс-компиляция .....	246
Изменение корневого каталога .....	248
Создание кросс-компилятора Clang .....	250
Параметры настройки .....	250
Сборка и установка кросс-компилятора на основе Clang .....	251
Альтернативные методы сборки .....	252

Тестирование .....	254
Одноплатные компьютеры .....	254
Симуляторы .....	255
Дополнительные ресурсы .....	255
В заключение .....	256

## Глава 9. Статический анализатор Clang ..... 257

Роль статического анализатора.....	258
Сравнение классического механизма предупреждений со статическим анализатором Clang .....	258
Возможности механизма символического выполнения.....	262
Тестирование статического анализатора .....	265
Использование драйвера и компилятора .....	265
Получение списка доступных средств проверки.....	266
Использование статического анализатора в Xcode IDE .....	268
Создание графических отчетов в формате HTML .....	269
Анализ больших проектов .....	269
Расширение статического анализатора Clang собственными средствами определения ошибок .....	275
Архитектура проекта .....	275
Разработка собственного средства проверки .....	277
Дополнительные ресурсы .....	287
В заключение .....	289

## Глава 10. Инструменты Clang

### и фреймворк LibTooling ..... 290

Создание базы данных команд компиляции .....	290
Clang-tidy .....	292
Проверка исходного кода с помощью Clang-tidy .....	293
Инструменты рефакторинга .....	294
Clang Modernizer .....	295
Clang Apply Replacements.....	296
ClangFormat .....	298
Modularize .....	300
Module Map Checker.....	308
PPTrace .....	309
Clang Query .....	311
Clang Check .....	313
Удаление вызовов c_str().....	314
Создание собственного инструмента .....	314
Определение задачи – создание инструмента рефакторинга кода на C++.....	315
Определение структуры каталогов для исходного кода.....	315

Шаблонный код инструмента .....	317
Использование предикатов AST .....	321
Создание обработчиков .....	326
Тестирование нового инструмента рефакторинга .....	328
Дополнительные ресурсы .....	329
В заключение .....	329
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>331</b>