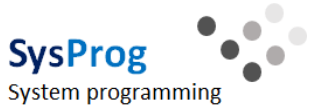
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

СИСТЕМНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

к.т.н.
Папулин Сергей Юрьевич
papulin_bmstu@mail.ru

Москва, 2021

Лекция. CPython



Основные темы

- CPython
- Объекты и типы данных
- Компилятор
- Интерпретатор
- Управление памятью
- Сборщик мусор
- Глобальная блокировка интерпретатора (GIL)

CPython

Компилятор и интерпретатор

- Компилятор – транслирует исходный код на некотором языке в другой язык или в выполняемые низкоуровневые инструкции (ассемблер или машинный код)
- Интерпретатор – транслирует инструкции некоторого языка в машинный код в процессе выполнения программы
- Интерпретаторы, как правило, сначала транслирует исходный код в более эффективное низкоуровневое представление, которое затем используется в процессе выполнения
- Компилируемые языки программирования в меньшей степени переносимы на разные CPU и ОС
- Интерпретируемые языки программирования, наоборот, как правило, платформо-независимые

Интерпретатор CPython (1)

- CPython – это Python интерпретатор, написанный на C
- Является интерпретатором по умолчанию
- Интерпретатор – программа, которая запускает Python скрипты/программы
- Существуют несколько реализаций Python интерпретатора помимо CPython:
  - Jython (на Java)
  - IronPython (на C#/.NET)
  - PyPy (RPython + JIT)

Интерпретатор CPython (2)

Выполнение Python программы можно представить тремя стадиями:

- Инициализация

  CPython инициализирует структуры данных, необходимые для запуска Python, загружает встроенные типы, модули и пр.

- Компиляция

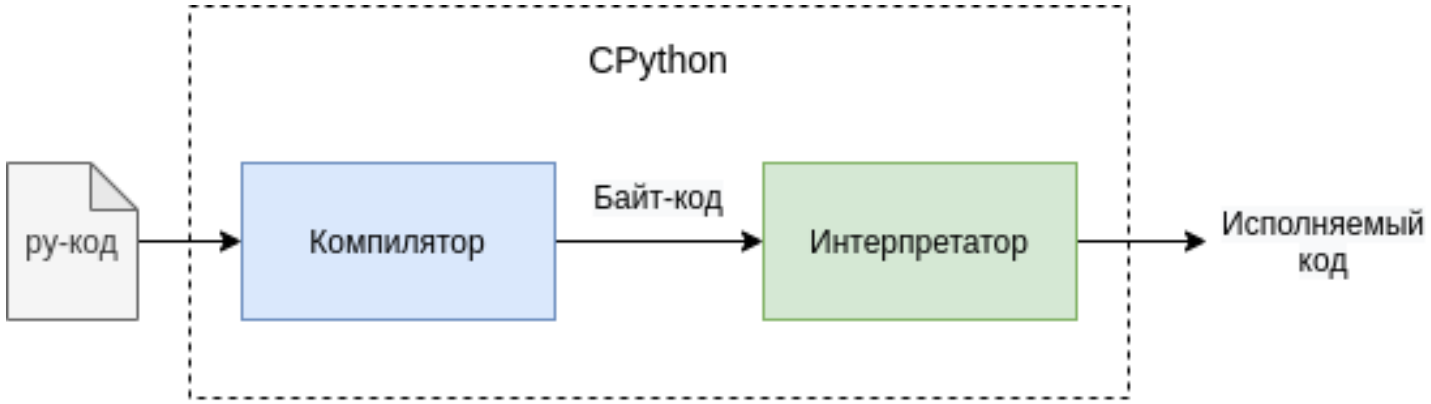
  CPython компилирует исходной код в байт-код:
  - Разбирает (парсит) исходный код
  - Строит абстрактное синтаксическое дерево (AST)
  - Генерирует байт-код из AST
  - Оптимизация

- Интерпретация из байт-кода в машинный

Интерпретатор CPython (3)

- Байт-код – низкоуровневое платформо-независимое промежуточное представление исходного кода
- Часть CPython, отвечающая за выполнения байт-кода, называется виртуальной машиной. При выполнении виртуальная машина управляет объектами кода, фрейма, отслеживает состояния потоков, интерпретаторов и среды выполнения
- Таким образом, исходный код на Python компилируется в байт-код, который затем интерпретируется виртуальной машиной (средой выполнения) Python (PVM)

Интерпретатор CPython (4)



Объекты и типы данных (1)

- Языки программирования со статической типизацией (C, Java) требуют в явном виде указывать тип переменных. Python относится к языкам программирования с динамической типизацией, в которых это не требуется

- Каждый объект в CPython имеет идентификатор, тип и значение. Идентификатор объекта не меняется после создания

- Объекты: целые числа (int), список (list), класс (class), модуль (module), функция (function), python байткод (code) и пр.

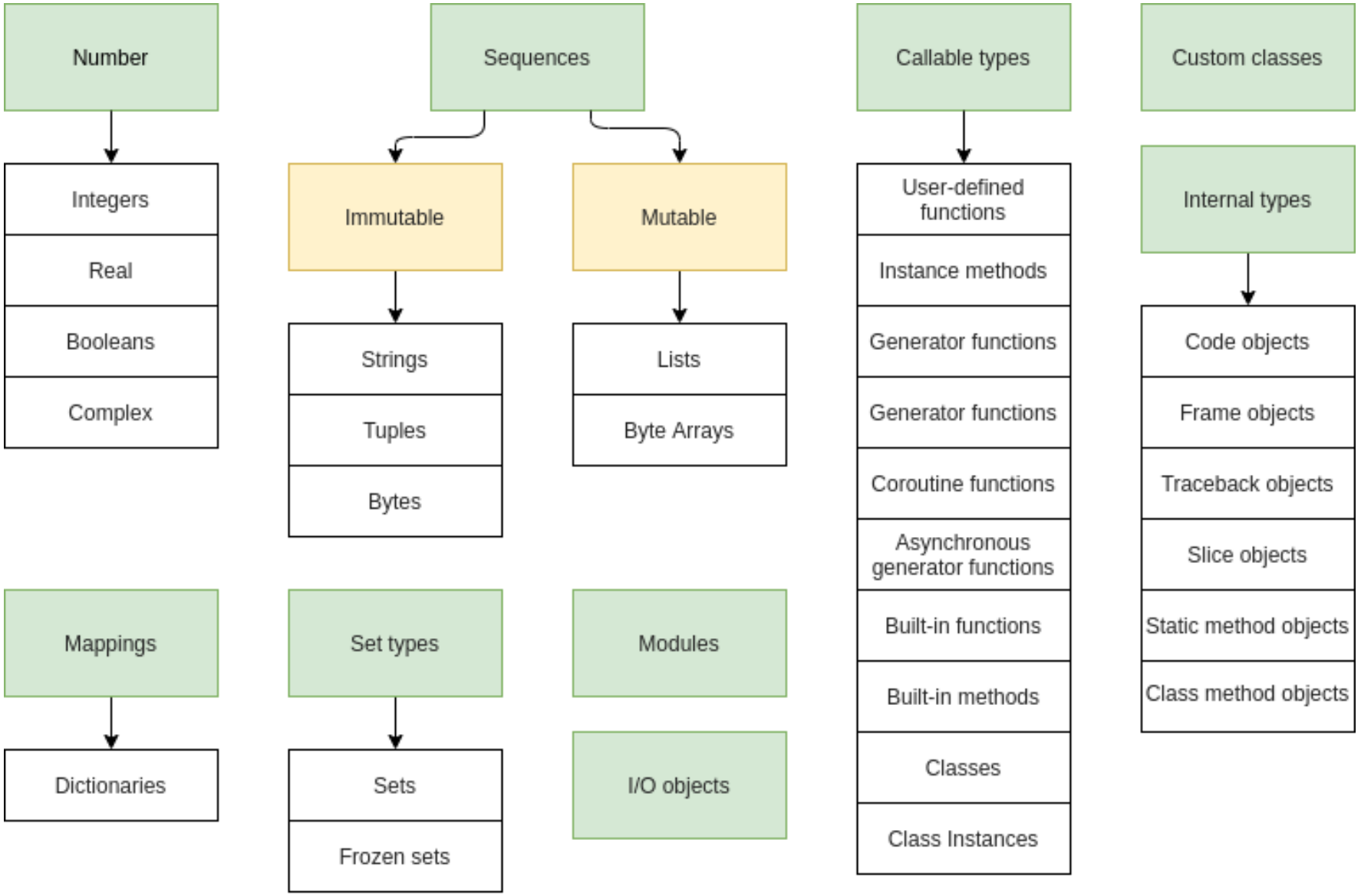
- Тип объекта определяет набор операций, которые поддерживает объект, и возможные значения

- Тип есть объект типа type

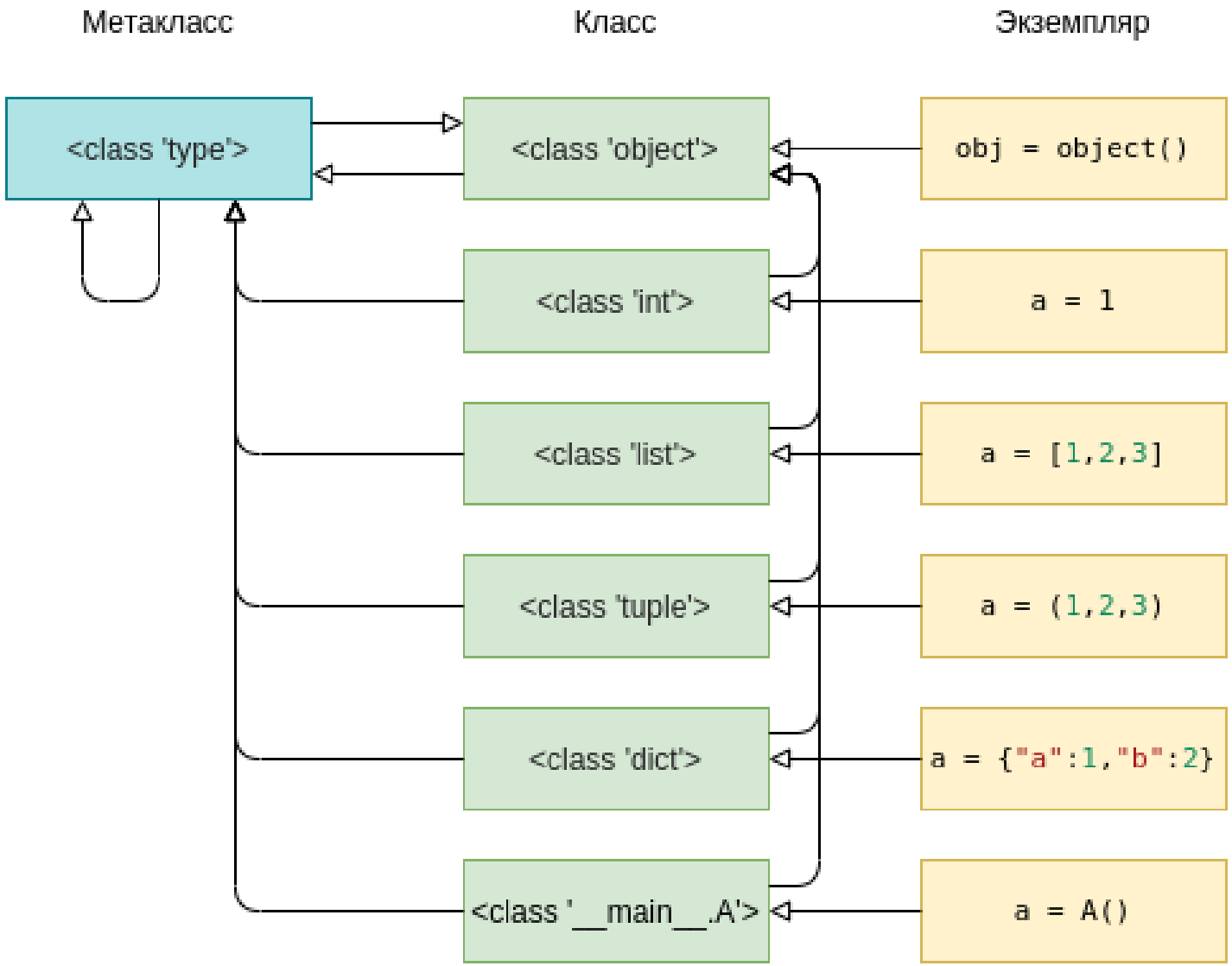
Объекты и типы данных (2)

- Значение некоторых объектов может меняться
- Объекты, чьё значение может меняться, называются изменяемые (mutable): словари, списки
- Объекты, чьё значение не изменяется, называются неизменяемые (immutable): строки, числа, кортежи
- object является базовым классом для всех объектов, type тоже объект (экземпляр объекта)
- Объекты никогда не удаляются в явном виде. За это отвечает сборщик мусора

Объекты и типы данных (3)



Объекты и типы данных (4)



Объекты и типы данных (5)

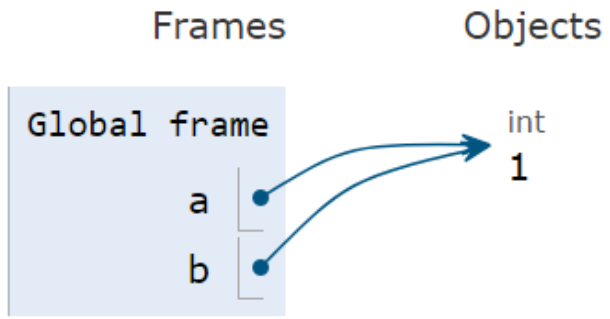
Выражения присваивания в Python:

- Создает объект (если не существует)
- Формирует связь между объектом и именем

Код

```
a = 1
b = 1
```

Визуализация



Объекты и типы данных (5)

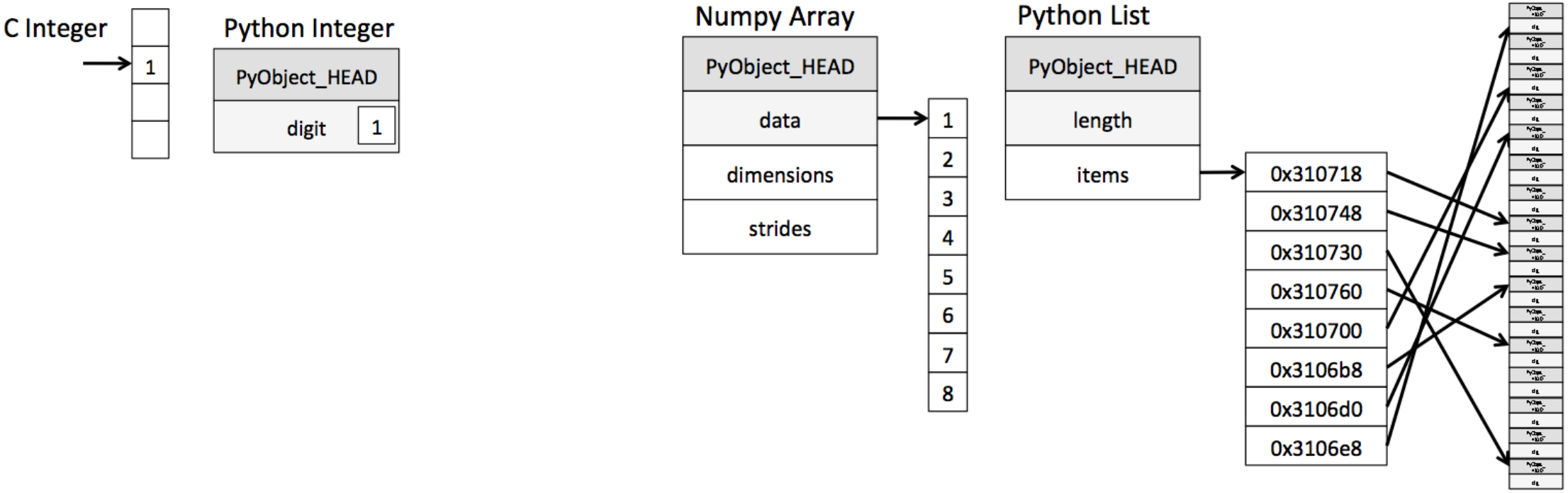
- В CPython объекты соответствуют структуре PyObject

- Все Python объекты (PyObject) имеют:
  - ob_refcnt – счетчик ссылок (используется для сборщика мусора)
  - ob_type – определяет тип объекта: указатель на структуру описания Python объекта (например, int, list, dict, функция и пр.)

- Почти все Python объекты находятся в куче. Для работы с объектами объявляются переменные-указатели типа PyObject*

- Исключением является объекты типов. Представляются статическими объектами PyTypeObject

Объекты и типы данных (6)



https://jakevdp.github.io/PythonDataScienceHandbook/02.01-understanding-data-types.html

Компилятор (1)

В CPython компиляция исходного кода в байт-код происходит в несколько шагов:

- Токенизация исходного кода (Parser/tokenizer.c)
- Разбор потока токенов в абстрактное синтаксическое дерево (AST) (Parser/parser.c): Абстрактное синтаксическое дерево (AST) – высокоуровневое представление структуры программы. Каждый узел дерева обозначает структуры, встречающуюся в исходном коде
- Преобразование AST в граф потока управления (CFG) (Python/compile.c): Граф потока управления – направленный граф, который моделирует поток программы посредством базовых блоков. Каждый блок содержит соответствующий ему байт-код программы.
- Формирования байт-кода на основе графа (Python/compile.c): Код напрямую генерируется из базовых блоков (a post-order depth-first search)

Компилятор (1)

Исходный код на Python

```
def isum(a, b):
    c = a + b
    return c
```

Байт-код – последовательность инструкций. Каждая инструкция состоит из двух байтов: код операции (opcode) и аргумент (arg)

```
b'|\x00|\x01\x17\x00}\x02|\x02S\x00'
```

Компилятор (2)

Исходный код на Python

```
def isum(a, b):
    c = a + b
    return c
```

Дисассемблер

```
2           0 LOAD_FAST                0 (a)
            2 LOAD_FAST                1 (b)
            4 BINARY_ADD
            6 STORE_FAST               2 (c)

3           8 LOAD_FAST                2 (c)
           10 RETURN_VALUE
```

Компилятор (3)

Дисассемблер

```
2           0 LOAD_FAST                0 (a)
            2 LOAD_FAST                1 (b)
            4 BINARY_ADD
            6 STORE_FAST               2 (c)

3           8 LOAD_FAST                2 (c)
           10 RETURN_VALUE
```

Таблица сопоставления кодов

OPNAME	OPCODE	BYTECODE	ARG	BYTEARG
LOAD_FAST	124	b'|'	0	b'\x00'
LOAD_FAST	124	b'|'	1	b'\x01'
BINARY_ADD	23	b'\x17'	None	b'\x00'
STORE_FAST	125	b'}'	2	b'\x02'
LOAD_FAST	124	b'|'	2	b'\x02'
RETURN_VALUE	83	b'S'	None	b'\x00'

Компилятор (4)

Исходный код

```
def isum(a, b):
    return a + b
isum(1, 2)
```

Абстрактное синтаксическое дерево (AST)

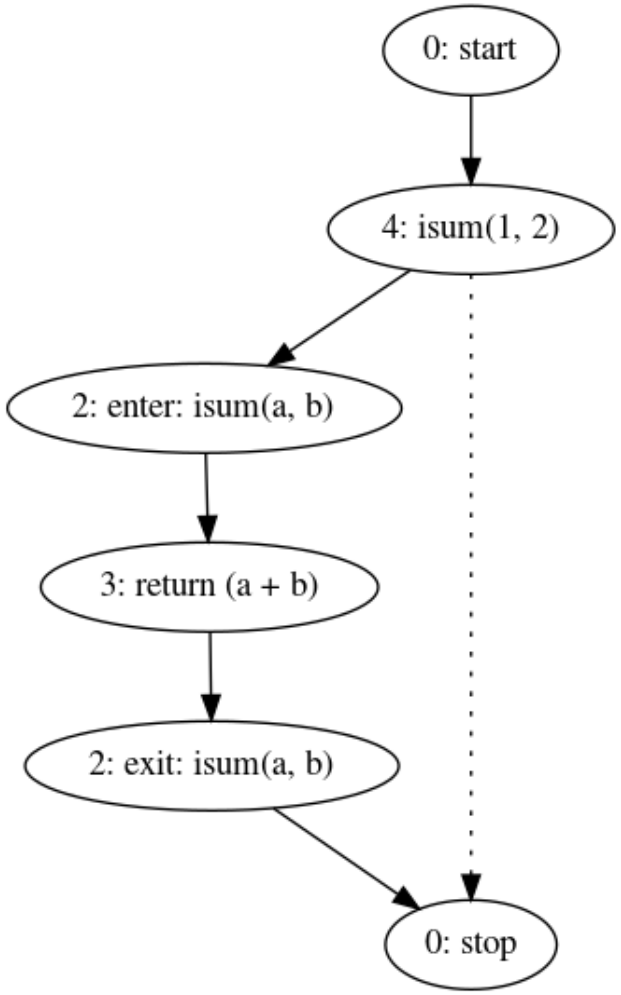
```
Module(
    body=[
        FunctionDef(
            name='isum',
            args=arguments(
                args=[
                    arg(arg='a', annotation=None),
                    arg(arg='b', annotation=None)],
                vararg=None, kwonlyargs=[],
                kw_defaults=[],
                kwarg=None, defaults=[]),
            body=[
                Return(
                    value=BinOp(
                        left=Name(id='a', ctx=Load()),
                        op=Add(),
                        right=Name(id='b', ctx=Load())))
            ],
            decorator_list=[], returns=None),
        Expr(value=Call(
            func=Name(id='isum', ctx=Load()),
            args=[Num(n=1), Num(n=2)], keywords=[]))
    ]
)
```

Компилятор (5)

Абстрактное синтаксическое дерево (AST)

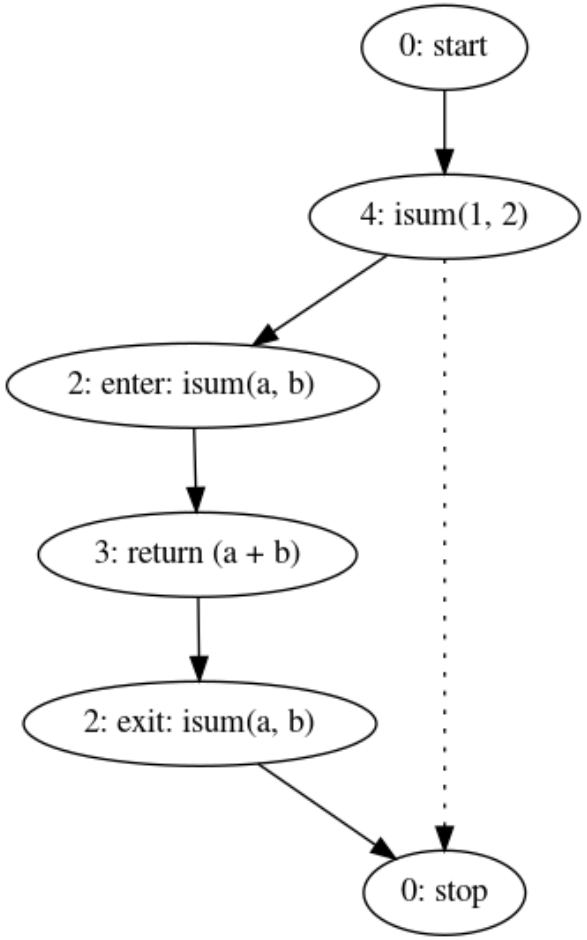
```
Module(
    body=[
        FunctionDef(
            name='isum',
            args=arguments(
                args=[
                    arg(arg='a', annotation=None),
                    arg(arg='b', annotation=None)],
                vararg=None, kwonlyargs=[],
                kw_defaults=[],
                kwarg=None, defaults=[]),
            body=[
                Return(
                    value=BinOp(
                        left=Name(id='a', ctx=Load()),
                        op=Add(),
                        right=Name(id='b', ctx=Load())))
            ],
            decorator_list=[], returns=None),
        Expr(value=Call(
            func=Name(id='isum', ctx=Load()),
            args=[Num(n=1), Num(n=2)], keywords=[]))
    ]
)
```

Граф потока управления (CFG)



Компилятор (6)

Граф потока управления (CFG)



Байт-код

```
b'd\x00d\x01\x84\x00Z\x00e\x00d\x02d\x03\x83\x02\x01\x00d\x04S\x00'
```

Интерпретатор. Среда выполнения (1)

- Виртуальная машина CPython при выполнении команда использует стек для хранения и извлечения данных
  - LOAD_FAST – добавляет локальную переменную в стек (адреса a и b)
  - BINARY_ADD – извлекает два элемента из стека, складывает и добавляет в стек
  - RETURN_VALUE – извлекает значение и возвращает результат
- Выполнение байт-кода происходит в большом исполняемом цикле (evaluation loop) до тех пор, пока есть инструкции на выполнение

Интерпретатор. Среда выполнения. Компоненты (1)

Объект кода (PyCodeObject)

- После компиляции исходного кода на Python в байт-код, виртуальная машина берет каждый инструкцию (opcode) из PyCodeObject
- Часть кода, которая выполняется как единый блок (например, модуль или функция), называется блоком кода (code block)
- CPython хранит информацию о том, что выполняет некоторый блок кода, в структуре называемой объект кода (code object). Он содержит байт-код и такие данные как список имен переменных, используемых внутри блока. Запустить модуль или вызвать функцию означает начать выполнение соответствующего объекта кода

Интерпретатор. Среда выполнения. Компоненты (2)

Объект функции (PyFunctionObject)

- Объект функции помимо объекта кода включает дополнительную информацию, такую как имя функции, docstring, аргументы по умолчанию, значения переменных, объявленных внутри блока функции

- Для создания объекта функции используется инструкция MAKE_FUNCTION

Объект фрейма (PyFrameObject)

- Когда виртуальная машина выполняет объект кода, она должна отслеживать значения переменных и постоянно изменяющиеся значения стека. Она также должна запоминать, где она завершила выполнения текущего объекта кода, чтобы начать выполнять другого, и куда затем вернуться

- CPython хранит эту информация в объекте фрейма. Фрейм отслеживает состояние выполнения объект кода

Интерпретатор. Среда выполнения. Состояния

- Состояние среды выполнения

  Глобальное состояние процесса, включает GIL и управление памятью

- Состояние интерпретатора

  Группа потоков и некоторых данных, которые являются общими, например, импортированные модули

- Состояние потока

  Данные относящиеся к одному потоку ОС, включает стек вызова

- Основной цикл выполнения

  Место, где выполняются объекты фреймов

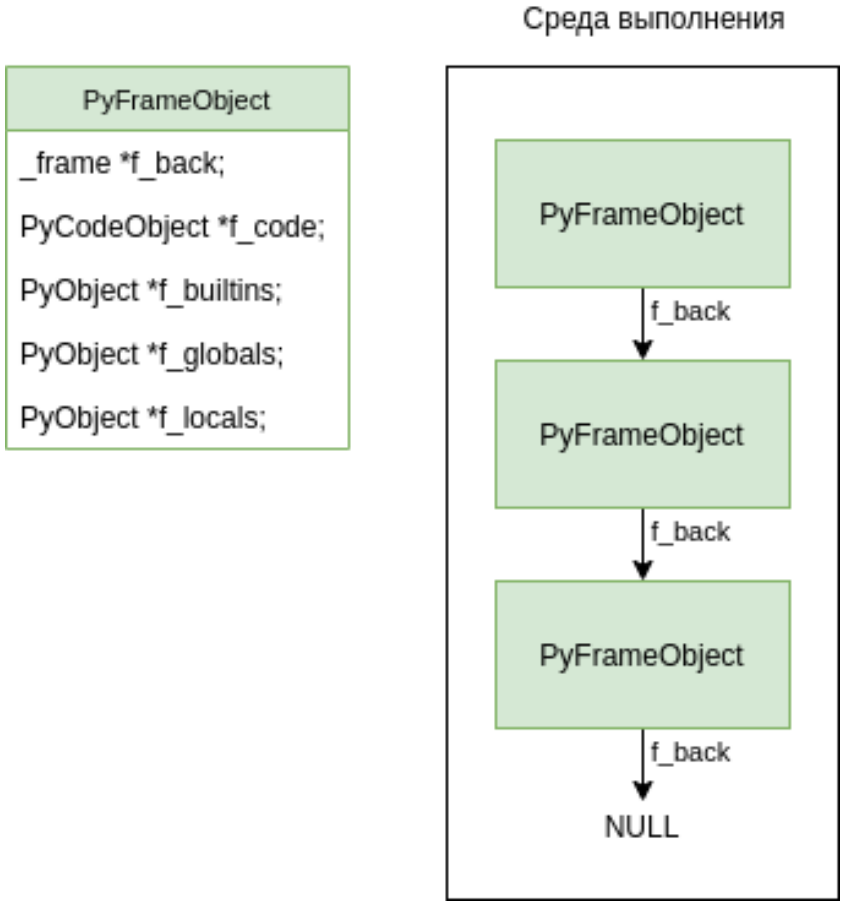
Интерпретатор. Среда выполнения. Стек вызова/фрейма (1)

- Основная структура запущенной Python программы. Содержит один элемент – фрейм – для каждого вызова функции. Нижняя часть стека – точка входа программы. Каждый вызов функции добавляет новый фрейм в стек, а при завершении выполнения извлекается из него
- Первый фрейм создается для выполнения объекта кода модуля. CPython создает новый фрейм каждый раз, когда необходимо выполнить другой объект кода
- Каждый фрейм имеет ссылку на предыдущий фрейм
- Представляется как стек фреймов, в котором текущий фрейм находится сверху
- Данная структура называется стеком вызова (call stack)
- При возвращении из текущего выполняемого фрейма CPython продолжает выполнение следующих инструкций предыдущего фрейма

Интерпретатор. Среда выполнения. Стек вызова/фрейма (1)

- Фрейм представляются структурой PyFrameObject. Для создания фрейма используется функция PyFrame_New

- После получения инструкции (opcode) из PyFrameObject, функция PyEval_EvalFrameEx обработает её и запустит



Интерпретатор. Среда выполнения. Стек данных и блока

– Стек данных

В каждом фрейме есть стек выполнения – стек данных. Этот стек используется при выполнении инструкций с данными, например, загрузка аргумента, сложение элементов и пр.

– Стек блока

Каждый фрейм содержит стек блоков. Используется для отслеживания определенных типов структур управления: циклов, обработчиков исключений (try/except). Помогает определить какой блок является активным в текущий момент и, например, правильно обрабатывать команды continue и break

Интерпретатор. Среда выполнения. Примеры работы стеков

Разбор примеров

https://towardsdatascience.com/understanding-python-bytecode-e7edaae8734d

Визуализация

https://pythontutor.com/

Управление памятью

- Все Python объекты и структуры содержатся в частной куче (private heap). Управление этой кучей обеспечивается менеджером памяти CPython

- В CPython есть собственный распределитель памяти – **pymalloc**, который построен поверх C распределителя (C-runtime-allocator). Отвечает за выделение памяти небольшим объектам (меньше или равными 512 байт) с коротким временем жизни. Для этого используется так называемые арены (areanas) с фиксированным размером в 256 КБ

- Компоненты pymalloc: арены, пулы, блоки

- Для размещения объектов больше 512Б используются
  - PyMem_RawMalloc(size_t n)
  - PyMem_RawRealloc(size_t nelem, size_t elsize)

Управление памятью. pymalloc (1)

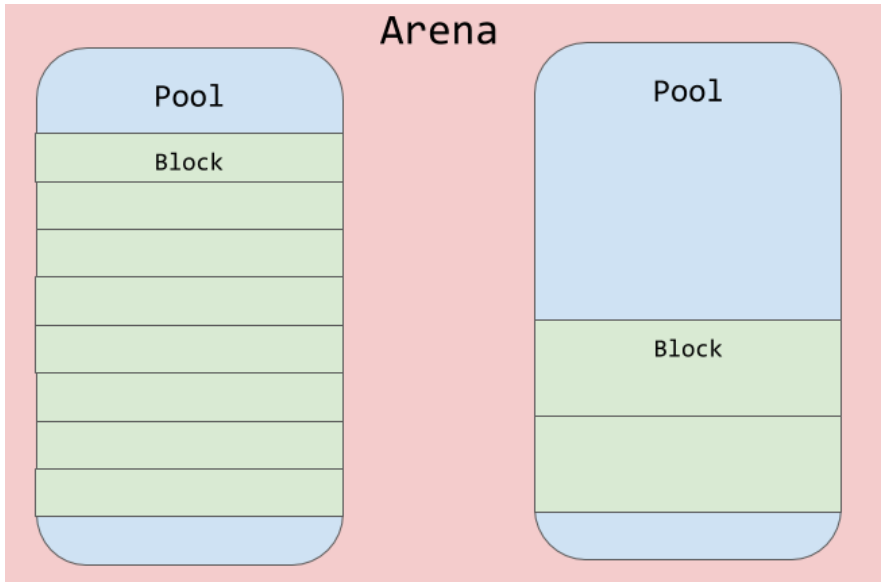
- Пулы состоят из блоков одного размера. Каждый пул поддерживает двойной связный список к другим пулам того же размера, что позволяет искать место нужного размера в разных пулах.

- Пулы могут находиться в трех состояниях:
  - Used (используется) – пул с доступными блоками для размещения данных
  - Full (полный) – пул, в котором нет свободных блоков не содержащих данных
  - Empty (пустой) – пустой пул, в котором при необходимости могут быть размещены блоки любого размера

- Если нам необходимо 8 байтный блок и нет доступных блоков в пулах с состоянием used, то пустой пул будет проинициализирован для хранения 8 байтных блоков. После размещения блока пул переходит в состояние использования (used) и доступен для размещения 8 байтных блоков в будущем

- Если заполненный пул в состоянии full освобождает некоторые свои блоки, так как записанные данные в память больше не нужны, то пул переходит в состояние used и добавляется в список используемых пулов данного размера.

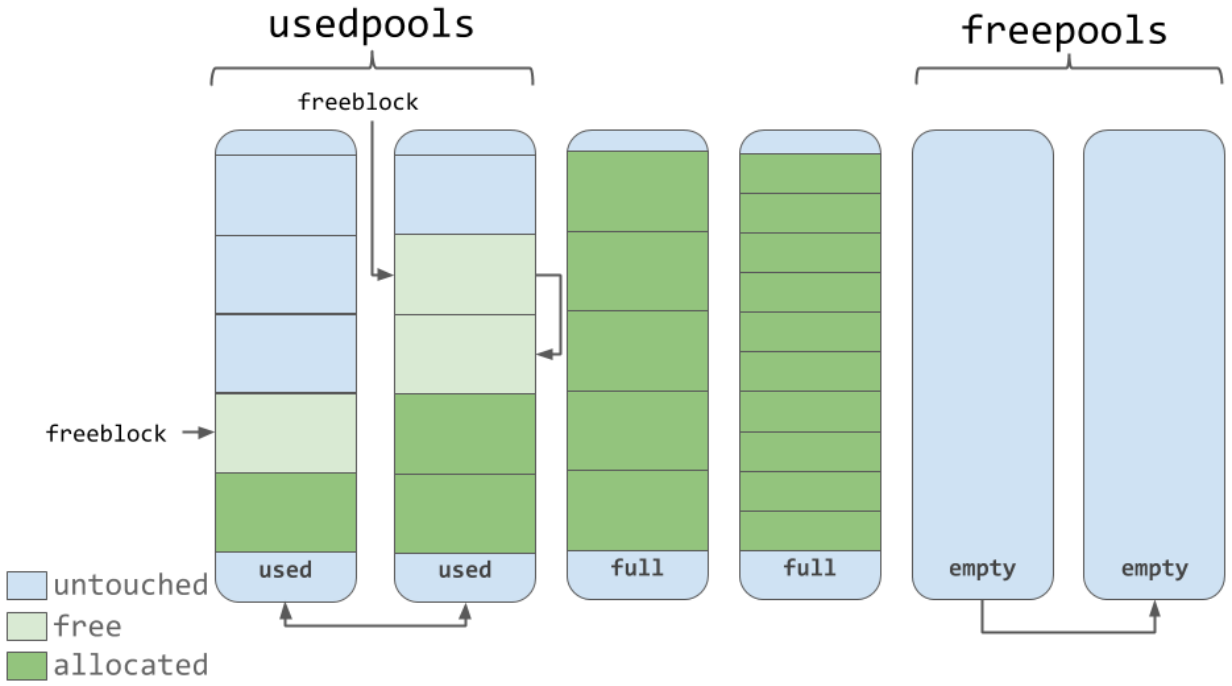
Управление памятью. pymalloc (2)




```
* Request in bytes       Size of allocated block       Size class idx
* ----------------------------------------------------------------
*         1-8                     8                       0
*         9-16                   16                       1
*        17-24                   24                       2
*        25-32                   32                       3
*        33-40                   40                       4
*        41-48                   48                       5
*        49-56                   56                       6
*        57-64                   64                       7
*        65-72                   72                       8
*          ...                   ...                     ...
*      497-504                   504                     62
*      505-512                   512                     63
```

https://realpython.com/python-memory-management/

Управление памятью. pymalloc (3)



https://realpython.com/python-memory-management/

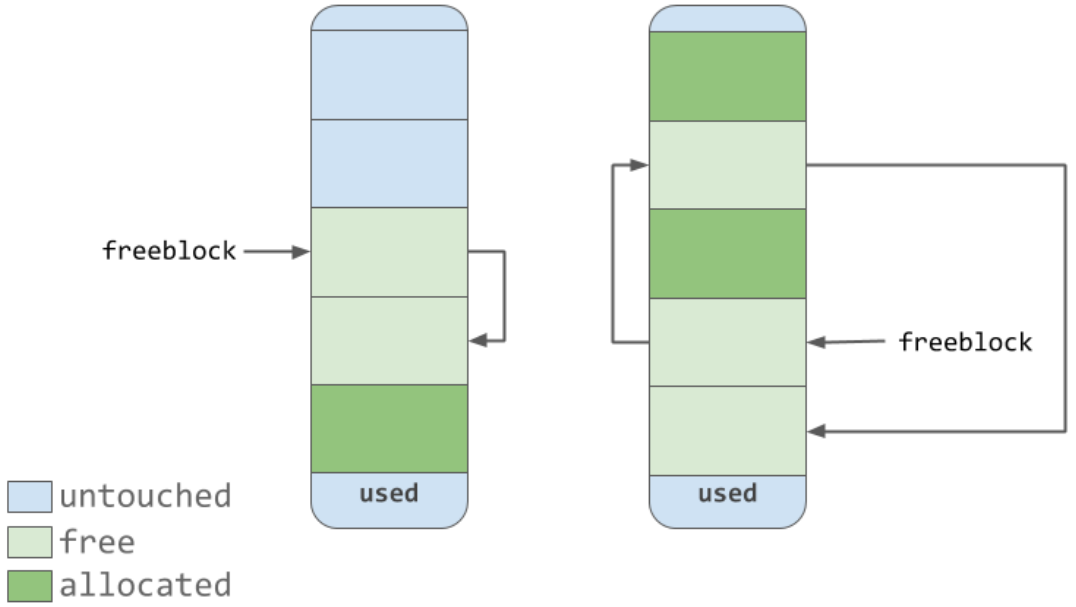
Управление памятью. pymalloc (4)

- Блоки могут находиться в трех состояниях:
  - Untouched (нетронутые) – порция памяти, которая не было назначена/распределена
  - Free (свободные) – порция памяти, которая была назначена, но потом освобождена CPython’ом и больше не содержит релевантных данных
  - Allocated (назначенные) – порция памяти, которая содержит релевантные данные

- Свободные блоки организованы в виде связного списка. Свободные блоки доступны для размещения новых данных

- Если необходимо больше, чем имеющиеся доступные свободные блоки, то распределитель будет использовать нетронутые (untouched) блоки. Таким образом, распределитель пользуется нетронутыми блоками, только когда не хватает свободных

Управление памятью. pymalloc (5)



https://realpython.com/python-memory-management/

Управление памятью. pymalloc (6)

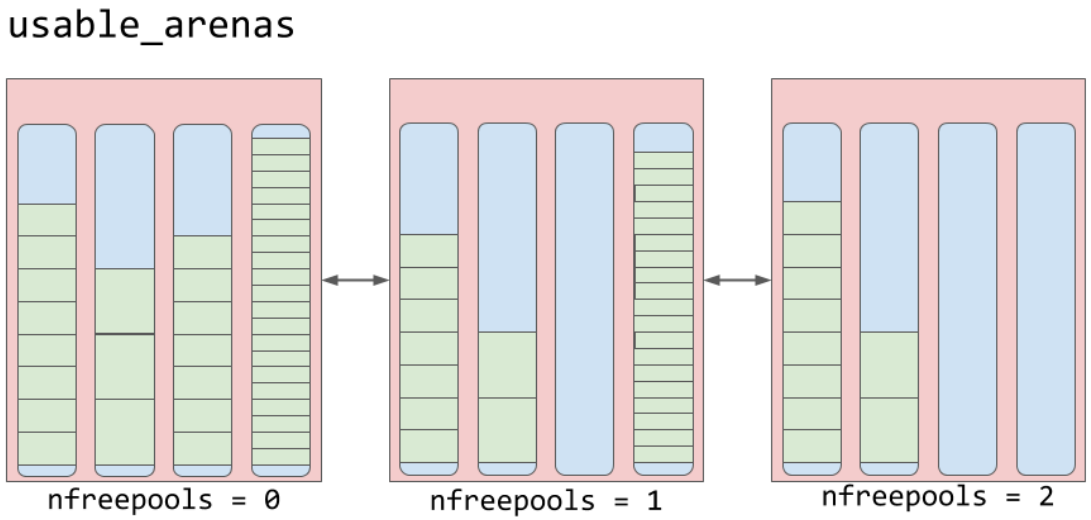
- Арены организованы в виде двойного связного списка usable_arenas. Этот список отсортирован по количеству доступных свободных пулов. Чем меньше свободных пулов, тем ближе к началу списка

- Это означает, что наиболее заполненный пул, будет выбран первым для размещения новых данных

- В действительности блоки при переходе в состояние free не освобождают память ОС. Python процесс по прежнем удерживает их для дальнейшего размещения новых данных

- Арена единственный компонент, который может действительно может освободить память. Поэтому аренам, которые ближе к тому, чтобы стать пустыми, дается шанс освободить в будущем память Python программы

Управление памятью. pymalloc (7)



https://realpython.com/python-memory-management/

Сборщик мусора

- Сборщик мусора необходим для освобождения памяти кучи от объектов, которые больше не используются, но при этом занимают некоторый объём памяти

- Для этой цели в CPython применяются две техники:

  - Подсчет ссылок (Reference counting)
  - Сборщик мусора с поколениями (Generational garbage collector)

Сборщик мусора. Подсчет ссылок

- Подсчет ссылок на объекты – простая техника, в которой объекты освобождаются, когда на них нет ссылок в программе. Если на объект нет ссылок, то считается, что он больше не нужен

- Каждая переменная в Python есть ссылка (указатель) на объект

- Для отслеживания ссылок каждый объект имеет дополнительное поле, называемое счетчик ссылок, который увеличивается или уменьшается, когда создается или удаляется указатель на объект, соответственно

- Если счетчик достиг нулевого значения, то CPython вызывает специальную функцию, отвечающую за удаление объекта из памяти

Сборщик мусора с поколениями (1)

- Техника подсчета ссылок имеет фундаментальную проблему – она не может обнаружить циклические ссылки
- Циклические ссылки возникают, когда один или более объектов ссылаются друг на друга
- Зацикливание может произойти только в объектах-контейнерах (которые могут содержать другие объекты), таких как списки, кортежи, словари, классы
- Алгоритм сборщика мусора с поколениями не отслеживает неизменяемые типы. Исключением являются кортежи
- Кортежи и словари, содержащие только неизменяемые объекты, при определенных условиях могут быть исключены из списка отслеживаемых объектов
- Техника подсчета ссылок используется только в случае отсутствия циклических ссылок

Сборщик мусора с поколениями (2)

- В отличие от техники подсчета ссылок, которая работает в реальном времени, сборщик мусора для объектов с циклическими ссылками запускается периодически
- Чтобы сократить частоту вызова сборщика и как следствия пауз в CPython используется различные эвристики
- Сборщик мусора разделяет объекты-контейнеры на три поколения. Каждый новой объект начинает с первого поколения. Если объект выживает итерацию сборки мусора, он перемещается в следующее поколение. Сборка для ранних поколений выполняется более часто, чем для более поздних поколений
- Это связано с тем, что большинство вновь созданных объектов прекращают свое существование в течение короткого промежутка времени
- Это улучшает производительность сборщика мусора и сокращает паузы в работе

Глобальная блокировка интерпретатора (GIL)

- Python интерпретатор не является полностью потокобезопасным (thread-safe). Для поддержки многопоточности Python программ, используется глобальная блокировка, называемая глобальная блокировка интерпретатора (Global Interpreter Lock – GIL). Перед доступом к Python объекту, текущий поток должен удерживать GIL. Без блокировки даже простейшие операции могут стать причиной проблем в многопоточной программе
- Пример: в случае, когда два потока одновременно увеличивают счетчик ссылок одного и того же объекта, может получиться так, что счетчик увеличится только на один вместо двух
- Поэтому только поток, который удерживает GIL, может производить операции над Python объектами или вызывать Python/C API функции
- Чтобы поддерживать подобие параллельности выполнения, интерпретатор переключает потоки с определенным интервалом. Блокировка также снимается перед блокирующими операциями ввода-вывода, такими как чтение или запись файла, так что другие потоки могут выполняться в промежутке
- Python интерпретатор хранит сопутствующую информацию о потоке в структуре данных PyThreadState. Глобальная переменная указывает на текущее состояние PyThreadState

Источники

- Python/C API Reference Manual / https://docs.python.org/3.7/c-api/index.html
- Python/C API Reference Manual. Introduction / https://docs.python.org/3.7/c-api/intro.html
- The Python Language Reference. Data model / https://docs.python.org/3.7/reference/datamodel.html
- Understanding Data Types in Python / https://jakevdp.github.io/PythonDataScienceHandbook/02.01-understanding-data-types.html
- Design of CPython's Compiler / https://devguide.python.org/compiler/
- Understanding Python Bytecode / https://towardsdatascience.com/understanding-python-bytecode-e7edaae8734d
- Python behind the scenes: how the CPython VM works / https://tenthousandmeters.com/blog/python-behind-the-scenes-1-how-the-cpython-vm-works/
- Memory Management / https://docs.python.org/3.7/c-api/memory.html
- Memory Management in Python / https://realpython.com/python-memory-management/
- Memory Management. Source Code / https://github.com/python/cpython/blob/3.7/Objects/obmalloc.c
- Design of CPython's Garbage Collector / https://devguide.python.org/garbage_collector/
- Garbage Collection for Python / http://www.arctrix.com/nas/python/gc/
- GC Module. Source Code / https://github.com/python/cpython/blob/v3.7.12/Modules/gcmodule.c