Garbage Collection

Попов Матвей

План

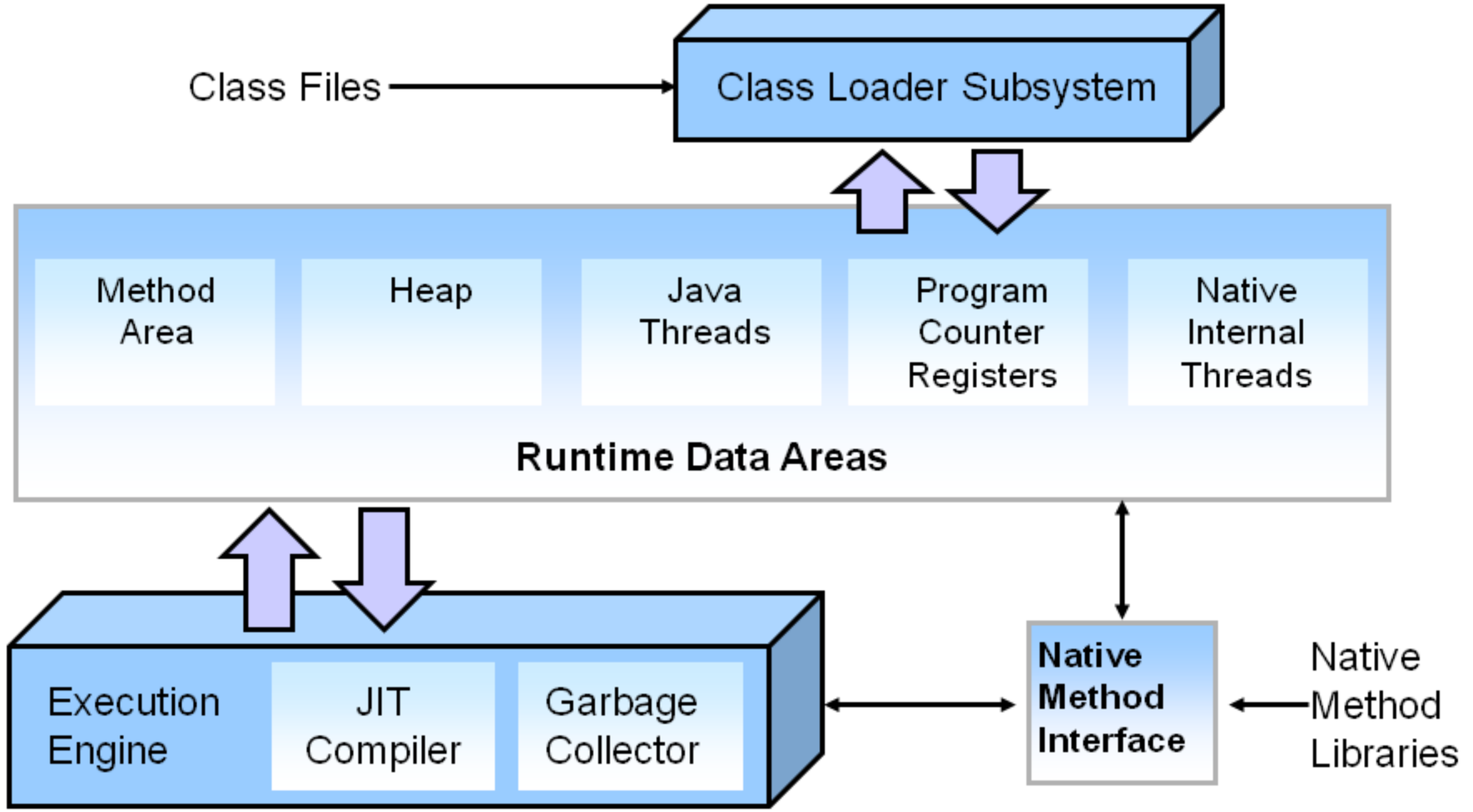
- Что такое Garbage Collection?
- Почему существуют несколько GC?
- Какие существуют GC в JDK?
- В чем их различие?

Что такое Garbage Collection?

Сборка мусора

Процесс автоматического управления памятью. Освобождение памяти выполняется автоматически специальным компонентом JVM - Garbage Collector.

HotSpot JVM: Architecture



А оно мне надо?

Резонный вопрос

- Далеко не любой программе требуется тонкая настройка GC
- Редко кто заметит что отклик поменялся на десяток ms
- А что если очистка занимает секунды?
- Как можно работать с тем, чего не знаешь?

Разделяй и властвуй

JVM разделяет память на две области

- Куча(heap) - в которой хранятся данные приложения
- Не-куча(non-heap) - в которой хранится код программы и вспомогательные данные

- Состояние non-heap в целом статично
- Non-heap глобально слабо поддается оптимизациям
- Механизмы функционирования non-heap не будем рассматривать

Из поколения в поколение

- У разных GC разные цели
- Но их обычно объединяет одна слабая гипотеза

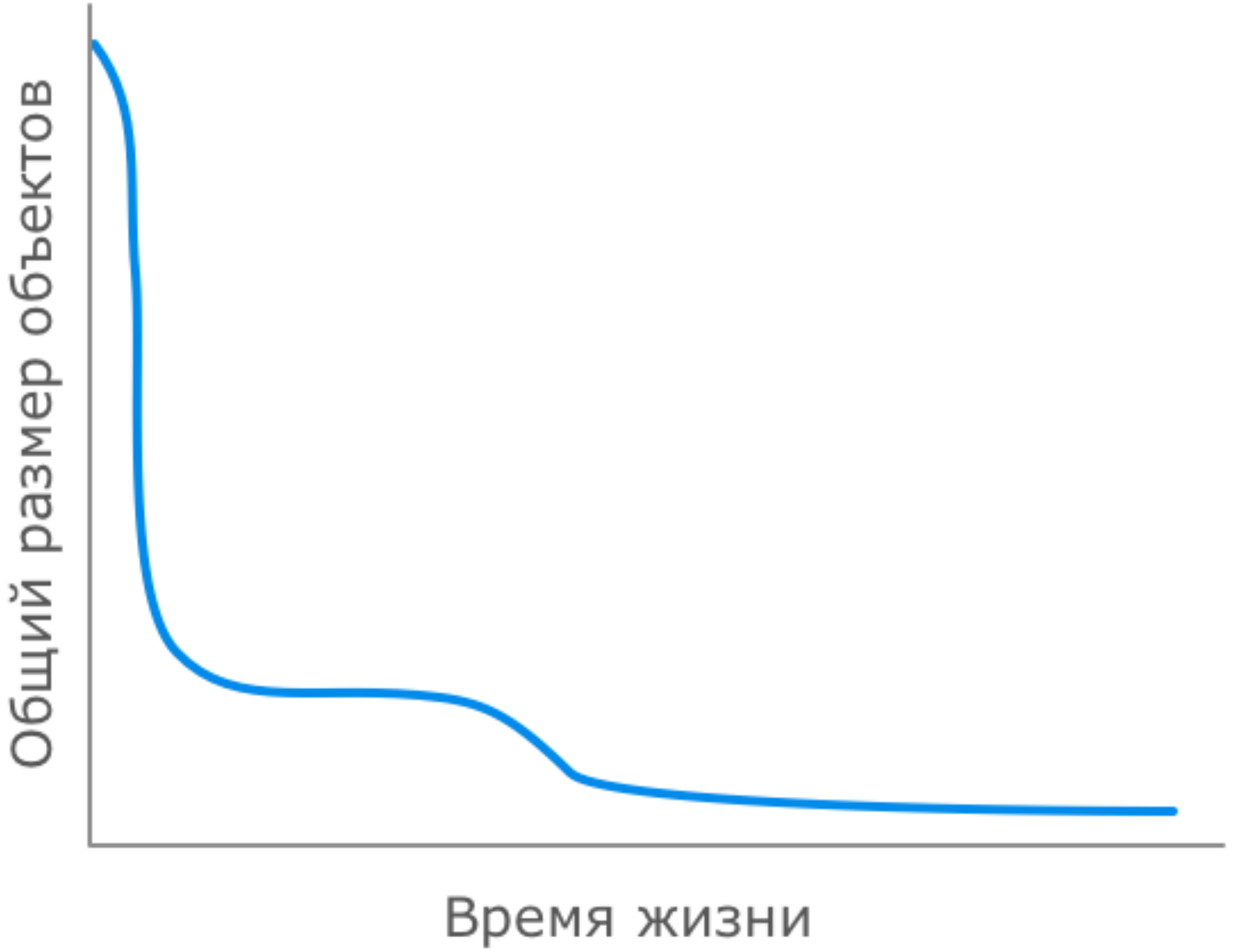
Слабая гипотеза о поколениях

Вероятность смерти объекта, как функция от возраста, снижается очень быстро.

Что это значит?

Подавляющее большинство объектов живут крайне недолго

Также это означает, что чем дольше прожил объект, тем выше вероятность того, что он будет жить и дальше


Общий размер объектов
Время жизни

Почему это так?

- Часто объекты создаются на очень короткое время(итераторы, локальные переменные, результаты боксинга)
- Далее идут объекты для более-менее долгих вычислений
- Объекты-старожилы - постоянные данные программы

Тут возникает идея разделения объектов

- Младшее поколение(young generation)
- Старшее поколение(old generation)

Процесс сборки тоже разделяется

- Малая сборка(minor GC)
- Полная сборка(full GC)

Важные факты:

- Разделение памяти не просто условное, она физически разделена на регионы
- Объекты по мере выживания переходят в следующие поколения
- В старшем поколении объект может прожить до конца работы приложения

Вам быстро, дешево или качественно?

- Хочется иметь сборщик, который как можно быстрее избавлялся от мусора
- Работа сборщика мусора не бесплатная
- Она оплачивается ресурсами и задержками программы

Существуют факторы эффективности GC

1. Максимальная задержка

Максимальное время, на которое сборщик приостанавливает выполнение программы для выполнение одной сборки(stop-the-world)

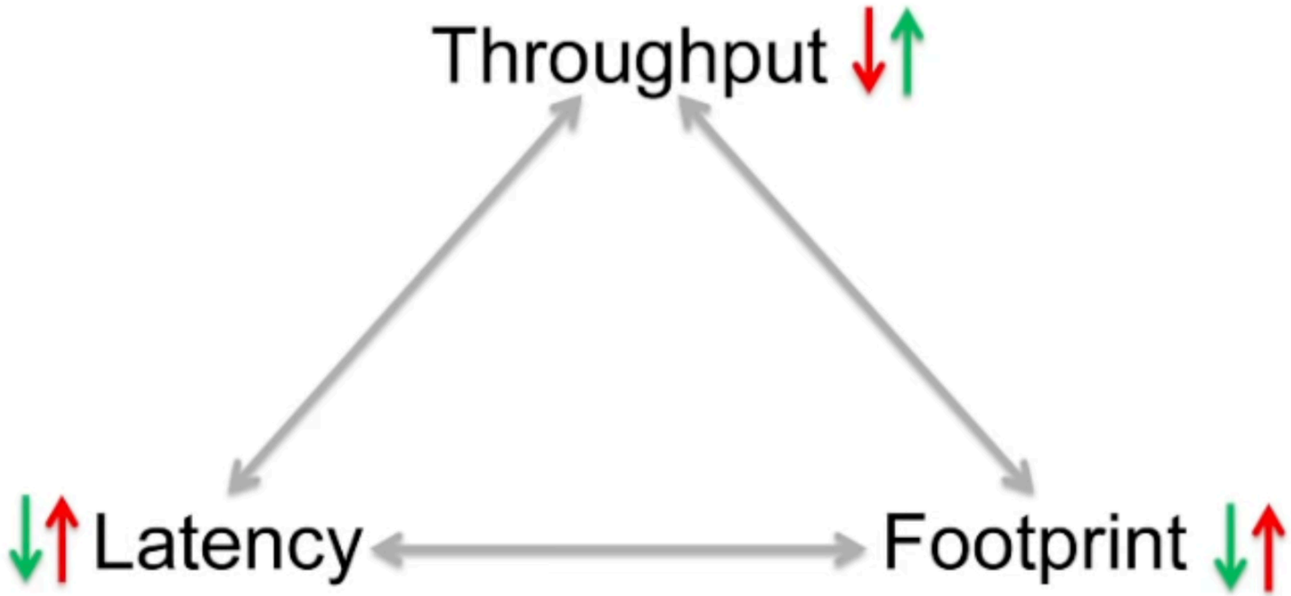
2. Пропускная способность

Отношение общего времени работы программы к общему времени простоя, вызванного сборкой мусора, на длительном промежутке времени

3. Потребляемые ресурсы

Объем ресурсов процессора и/или дополнительной памяти, потребляемых сборщиком

Оптимизируйте 2 из 3



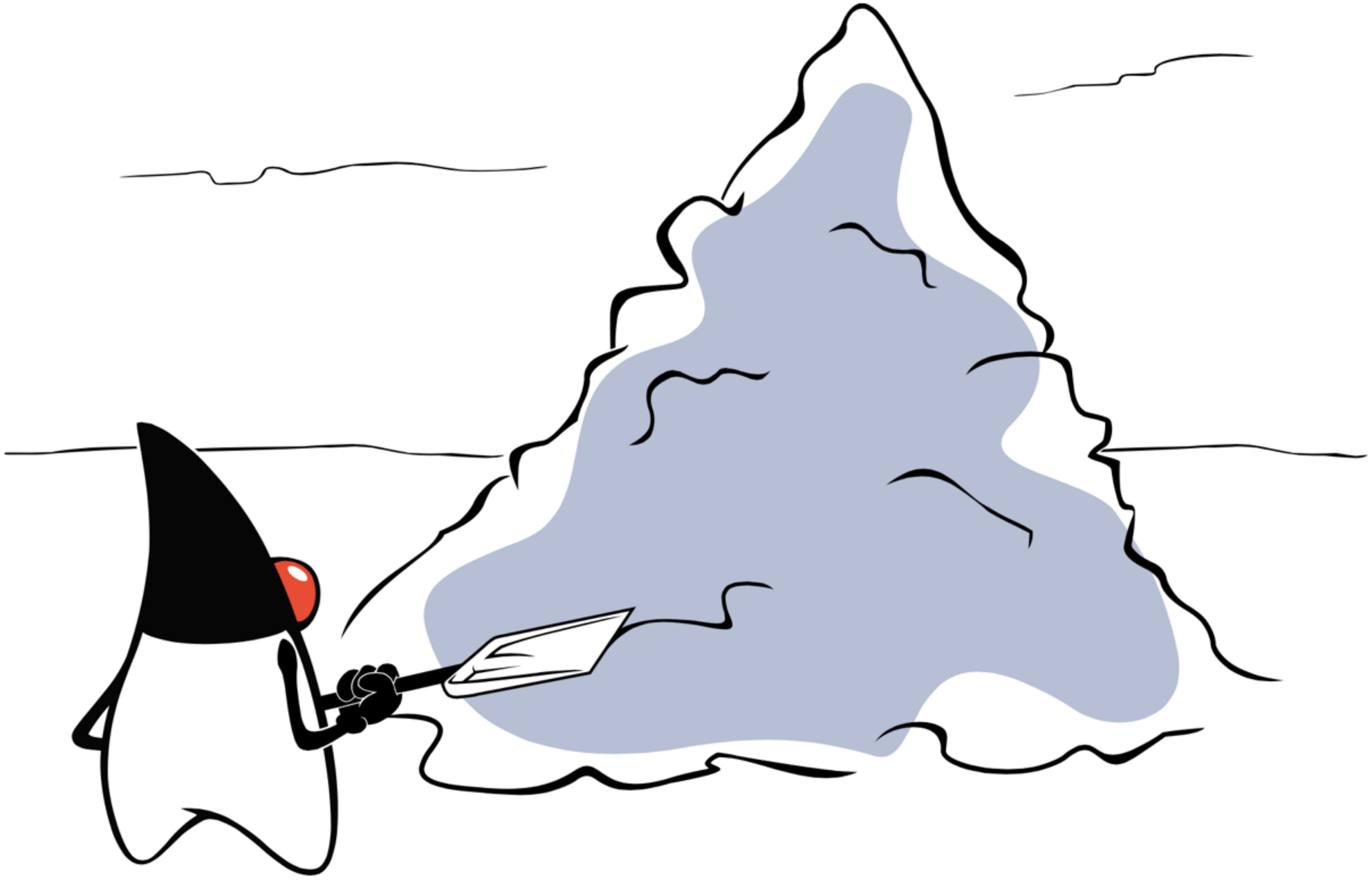
Как искать мусор?

Для этого есть корни сборки мусора(GC roots)

GC roots:

- Классы, загружаемые системным загрузчикам классов
- Регистры живых потоков
- Локальные переменные и параметры функций
- Переменный и параметры JNI
- Объекты, применяемые в качестве монитора синхронизации
- Объекты, удерживаемые из сборки мусора JVM для своих целей

Какие есть GC?



Java HotSpot VM предоставляет 7 сборщиков мусора

1. Serial (последовательный)
2. Parallel (параллельный)
3. Concurrent Mark Sweep (CMS)
4. Garbage-First (G1)
5. Epsilon GC
6. ZGC
7. Shenandoah GC

Начнем с простого

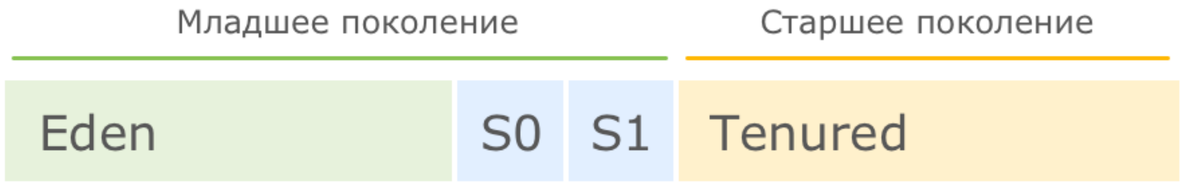
Serial GC и Parallel GC

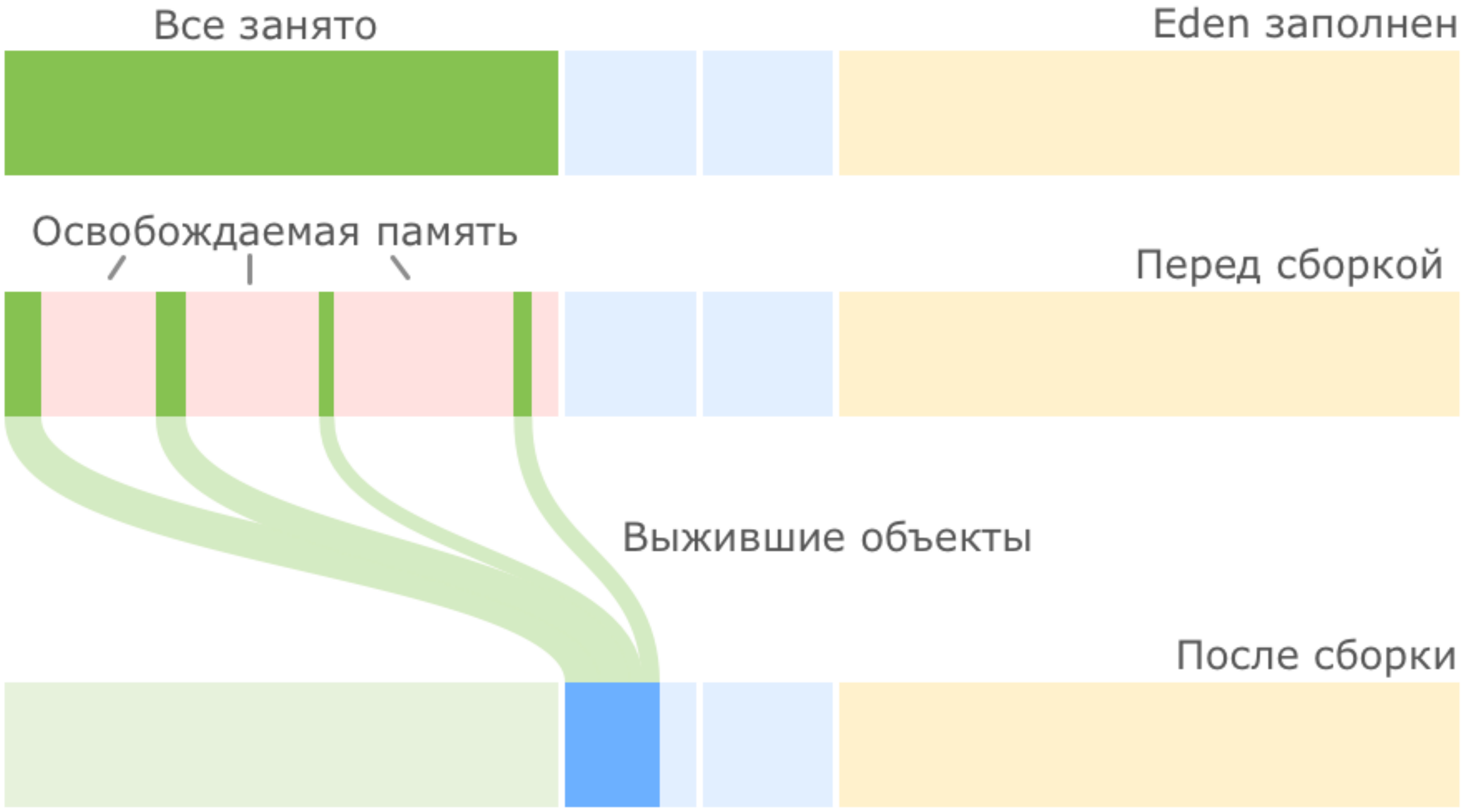
Serial GC

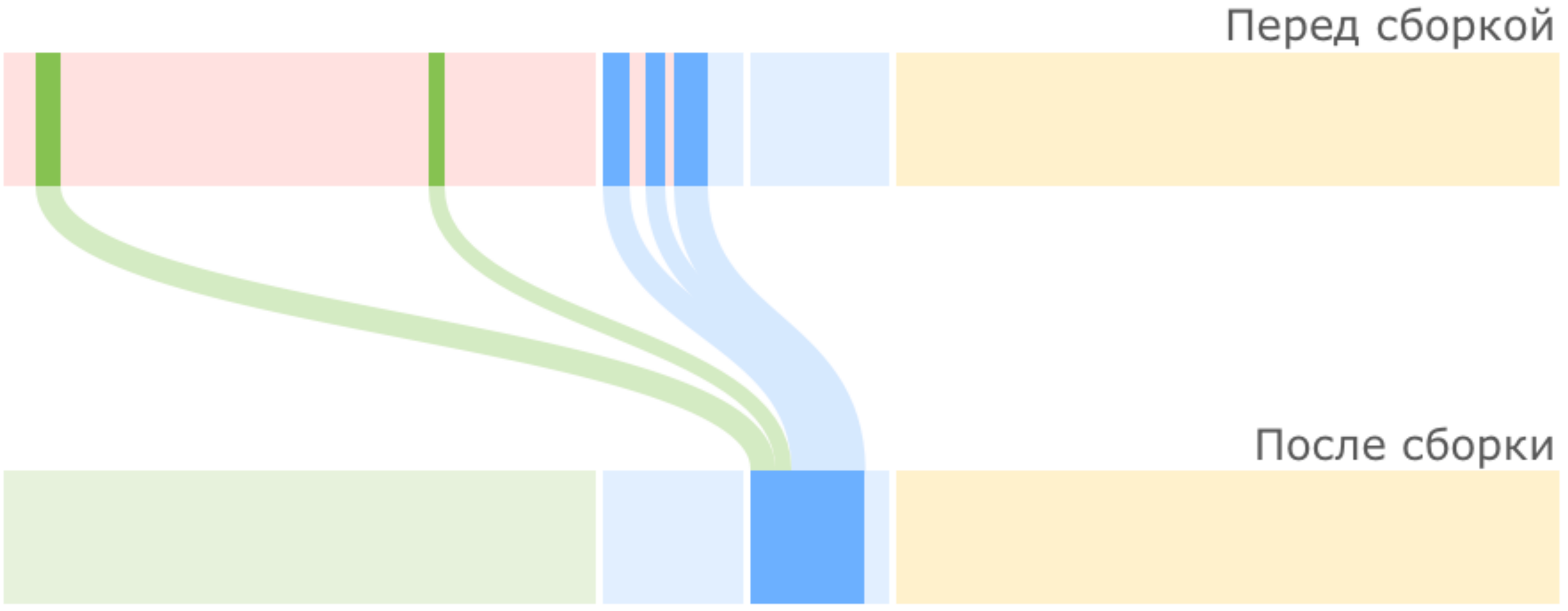
- Последовательный сборщик
- Самый просто сборщик
- Самый старый сборщик
- Используется когда heap очень мал
- Используется когда мало ресурсов
- Включается `-XX:+UseSerialGC`

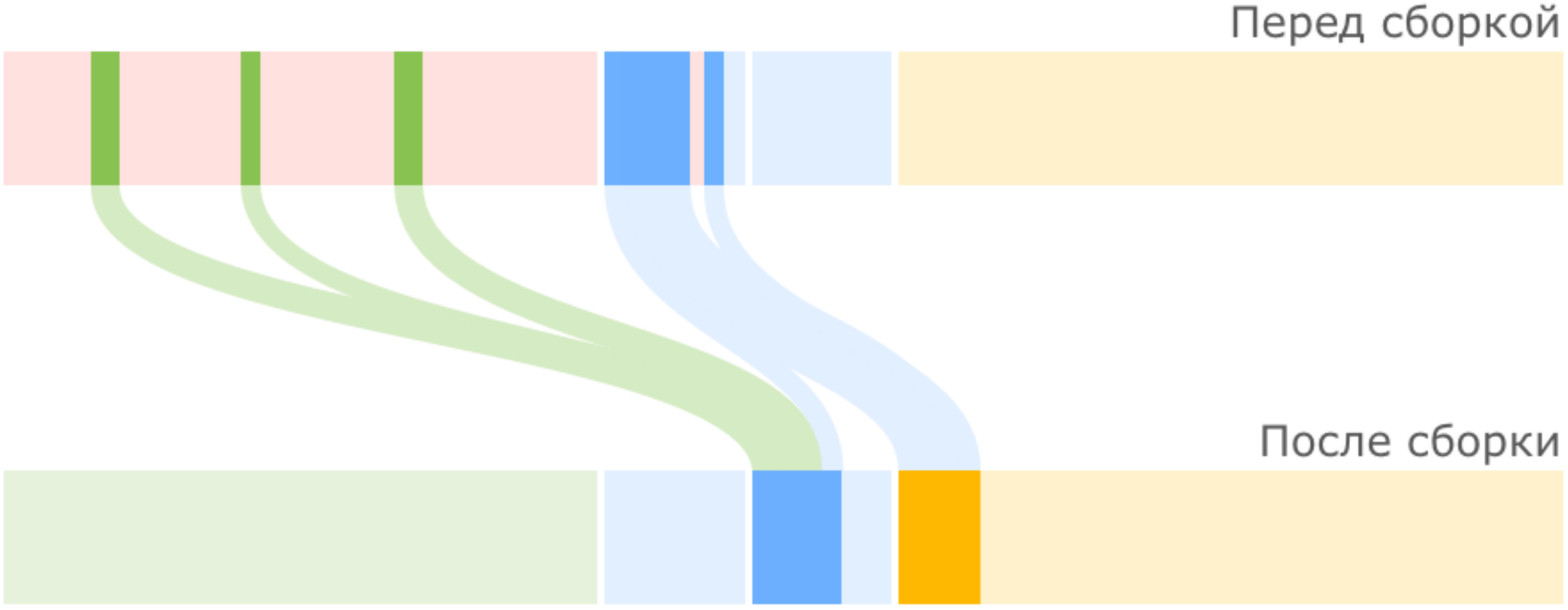
Принципы работы

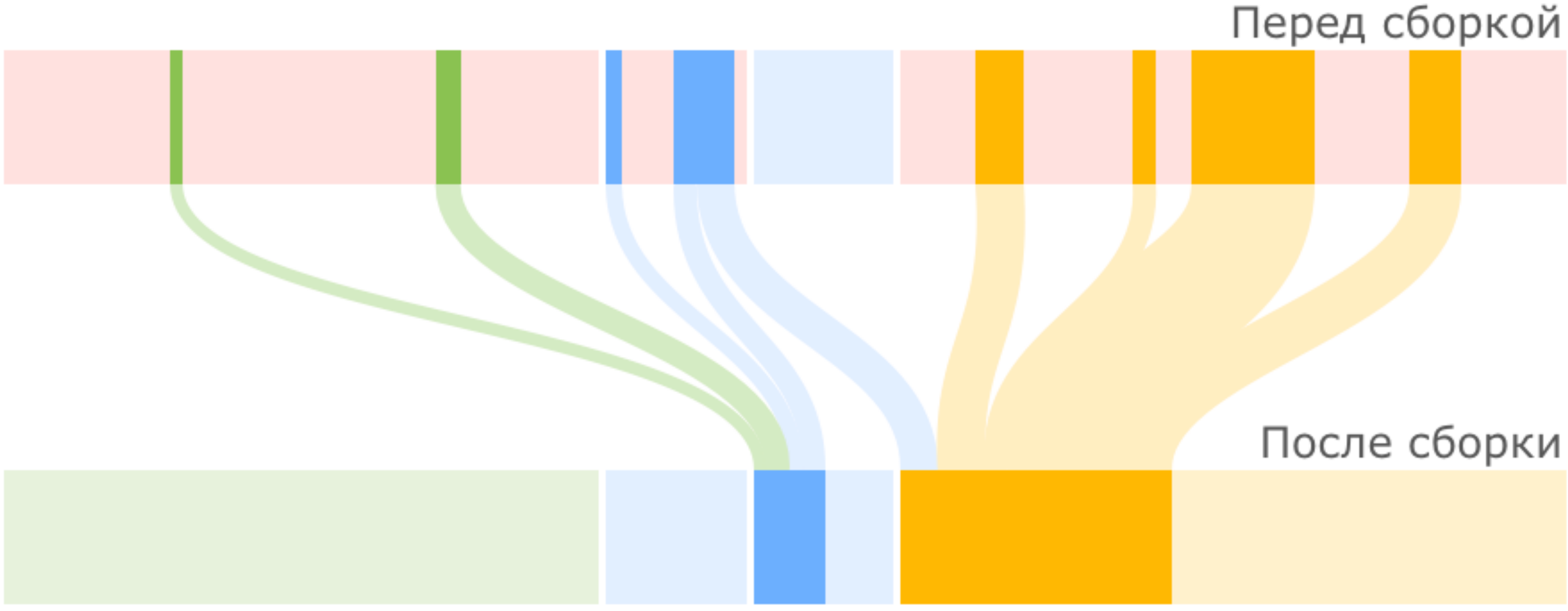
- Куча разбивается на 4 региона
- Три относятся к младшему: Eden, S0, S1
- Один к старшему: Tenured




Все занято
Eden заполнен
Освобождаемая память
Перед сборкой
Выжившие объекты
После сборки


Перед сборкой
После сборки


Перед сборкой
После сборки


Перед сборкой
После сборки

Достоинства и недостатки

- Непритязательность по части ресурсов компьютера
- Долгие паузы на сборку при заметных объемах памяти
- Можно тонко настраивать каждый регион heap
- Выполняет работу в одном потоке

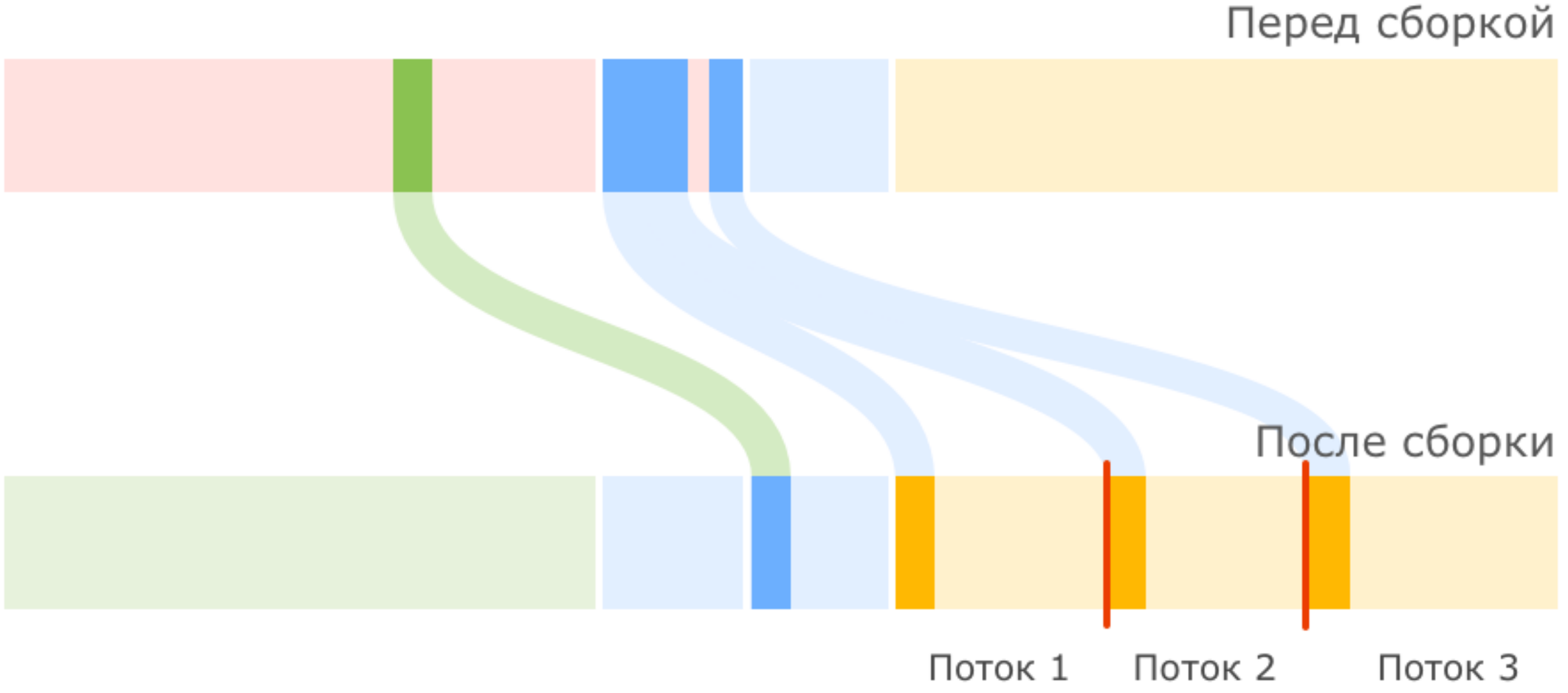
Когда использовать?

- Когда вашему приложению не требуется большой размер кучи
- Oracle указывает до 100МБ
- Приложение не чувствительно к коротким остановкам
- Доступно только одно ядро процессора

Parallel GC

- Используется те же самые подходы к организации heap что и Serial GC
- Сборкой мусора занимаются несколько потоков параллельно
- Сборщик может самостоятельно подстраиваться под требуемые параметры производительности
- Включается `-XX:+UseParallelGC`

Принципы работы


Перед сборкой
После сборки
Поток 1
Поток 2
Поток 3

Преимущества и недостатки

- Есть настройки, ориентированные на достижение необходимой эффективности GC
- Оставляет возможность настройки размера регионов
- Паузы обычно короче чем в Serial GC
- Будет присутствовать небольшая фрагментация памяти
- Нет скрытых накладных ресурсов

Переходим к более сложным сборщикам

CMS GC и G1 GC

«Mostly concurrent collectors»

Что это значит?

- Часть своей работы выполняют параллельно с основными потоками приложения
- Потоки GC конкурируют за ресурсы процессора с основными потоками
- Есть свои преимущества и недостатки

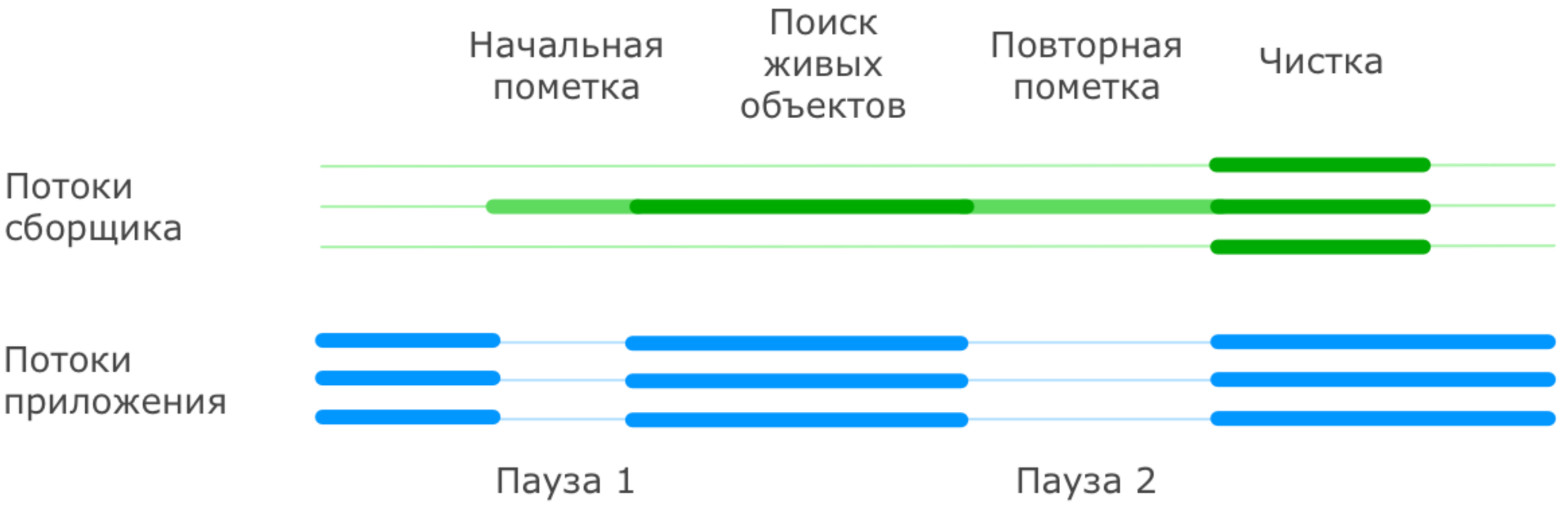
CMS GC

Concurrent Mark Sweep GC

- Появился вместе с Parallel GC
- Также раньше существовала альтернатива Incremental GC
- Предназначен для приложений чувствительным к STW паузам
- Предназначен для приложений имеющих доступ к нескольким ядрам
- Включается `-XX:+UseCMSGC`

Принципы работы

- Использует такие же принципы малой сборки мусора
- Отличается полной сборкой мусора
- В CMS она называется major GC
- Major не затрагивает объекты младшего поколения
- Всегда работает в фоне
- Не дожидается заполнения старшего региона


Начальная пометка
Поиск живых объектов
Повторная пометка
Чистка
Потоки сборщика
Потоки приложения
Пауза 1
Пауза 2

Ситуации STW

- Малая сборка мусора
- Начальная фаза поиска живых объектов при старшей сборке(initial mark pause)
- Фаза дополнения набора живых объектов при старшей сборке(remark pause)
- Когда сборщик не успевает очистить Tenured до того как она закончится(concurrent mode failure)

Достоинства и недостатки

- Ориентированность на минимизацию времени простоя
- Жертвует ресурсами процессора
- Жертвует общей пропускной способностью
- Происходит фрагментация Tenured
- Возможны сбои конкуретного режима
- Нужно выделять больше памяти(на 20%)

Когда использовать?

- Приложениям, использующий большой объем долгоживущих данных
- Но лучше G1 GC

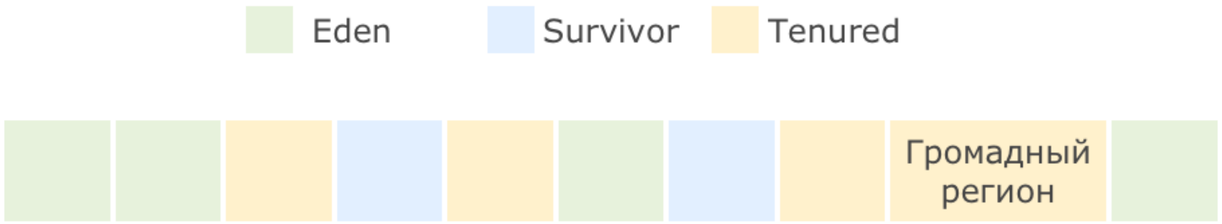
G1 GC

Garbage First GC

- Не является продолжением Serial/Parallel/CMS
- Использует существенно отличающийся подход к очистке памяти
- Позиционируется как сборщик для приложений с большими кучами
- Включается `-XX:+UseG1GC`

Принципы работы

- Память разбивается на множество регионов одинаково размера
- Разделение регионов логическое
- Существуют громадные(humongous) регионы

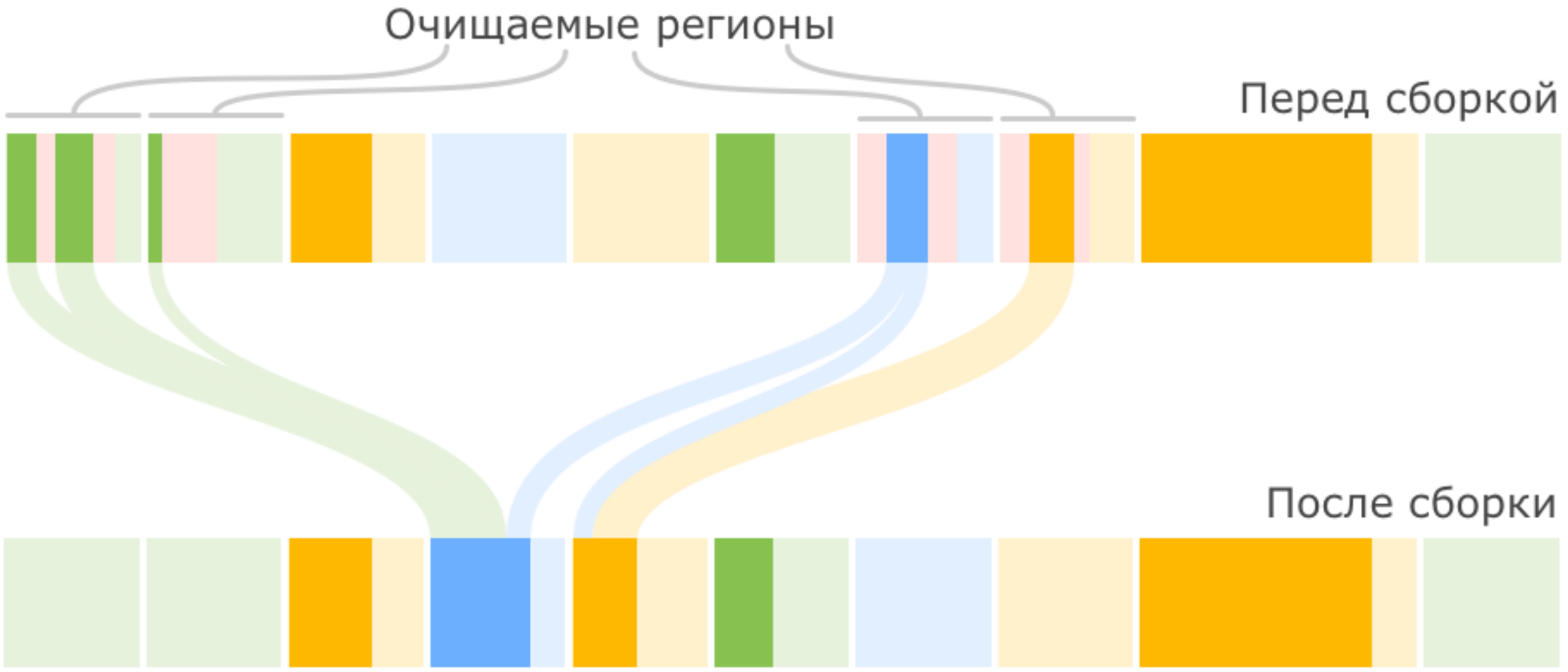


Как устроена малая сборка мусора?

- Выполняются для очистки и переноса
- Над переносом трудятся несколько потоков
- Очистка выполняется не на всем поколении, а только на части регионов
- Сборщик выбирает регионы, где скопилось наибольшее количество мусора

Цикл пометки:

- Initial Mark
- Concurrent Marking
- Remark
- Cleanup


Очищаемые регионы
Перед сборкой
После сборки

Ситуации STW:

- Процессы переноса объектов между поколениями
- Короткая фаза начальной пометки корней в рамках цикла пометки
- Более длинная пауза в конце фазы remark и в начале фазы cleanup

Достоинства и недостатки

- Более аккуратно предсказывает размеры пауз
- Не фрагментирует память
- Использует не мало ресурсов процессора
- Страдает пропускная способность приложения

ZGC

Зачем еще один?

Цели при проектировании:

- Поддерживать паузы STW на уровне меньше 1мс
- Сделать так, чтобы паузы не увеличивались с ростом кучи, объектов или корневых ссылок
- Поодержть кучи размером до 16ТБ

Что же получилось?

Начнем с виртуальной памяти

Виртуальная память

Метод управления памятью компьютера, позволяющий выполнять программы, требующие больше оперативной памяти, чем имеется в компьютере, путем автоматического перемещения частей программы между основной памятью и вторичным хранилищем.

Зачем нам эта информация?

В контексте ZGC

- Разные виртуальные страницы могут указывать на одну физическую
- Создание таких двойников не приводит к увеличению потребления физической памяти
- Один и тот же объект в физической памяти может иметь несколько виртуальных адресов
- ZGC активно эксплуатирует эту особенность

Теперь разберемся с указателями на объекты

ZGC использует подход, называемый раскрашиванием указателей

Что это значит?

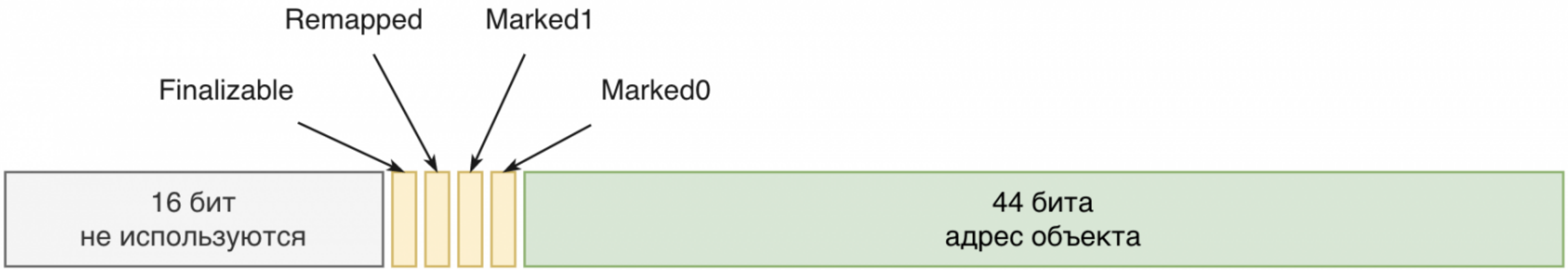
- Каждый 64 битный указатель содержит не только адрес памяти
- Указатель дополнительно содержит другие метаданные

Из чего состоит указатель?

- Под адрес в указателе выделяется от 42 до 44 младших бит
- Еще 4 бита выделены под метаданные
- Остальные 16 битов всегда равны 0 и никогда не используются

Что за метаданные?

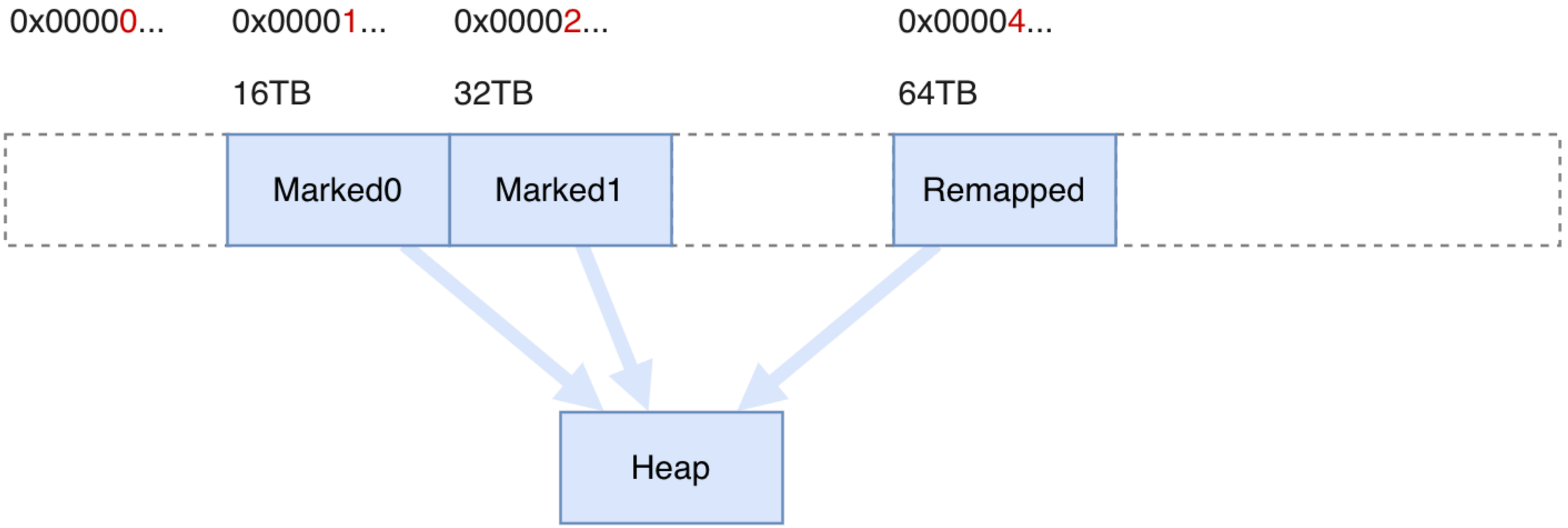
- Marked0(0001) и Marked1(0010) - используются для пометки указателей на разных фазах сборки
- Remapped(0100) - указатель помечается этим битом в случае, если адрес в указателе является окончательным и не должен модифицироваться в рамках текущего цикла сборки
- Finalizable(1000) - этим битом помечаются объекты, достижимые только из финализатора
- Комбинация этих флагов определяет состояние указателя, которое при описании ZGC называется его «цветом".


Remapped
Marked1
Finalizable
Marked0
16 бит
не используются
44 бита
адрес объекта

Теперь объединим это с виртуальной памятью

- Нулевой адрес(первые 44 бита) с каким-то «красочным» битом будет представлять собой начало 16-терабайтной области в виртуальной памяти

- Все эти области проецируются на одну и ту же область физической памяти - кучу JVM


0x00000...
0x00001...
0x00002...
0x00004...
16TB
32TB
64TB
Marked0
Marked1
Remapped
Heap

И что это нам дает?

Устанавливая или снимая какой-либо из битов метаданных мы переносимся в другую область виртуальной памяти

Но при этом получаем виртуальный указатель на тот же самый объект, на который ссылались до перекрашивания

Удобно

Теперь переходим к алгоритму сборки?

Нет

Барьеры

Барьер

Просто функция, которая принимает указатель на объект в памяти, анализирует цвет этого указателя, в зависимости от цвета выполняет какие-либо действия с этим указателем или даже с самим объектом, на который он ссылается, после чего возвращает актуальное значение указателя, которое необходимо использовать для доступа к объекту.

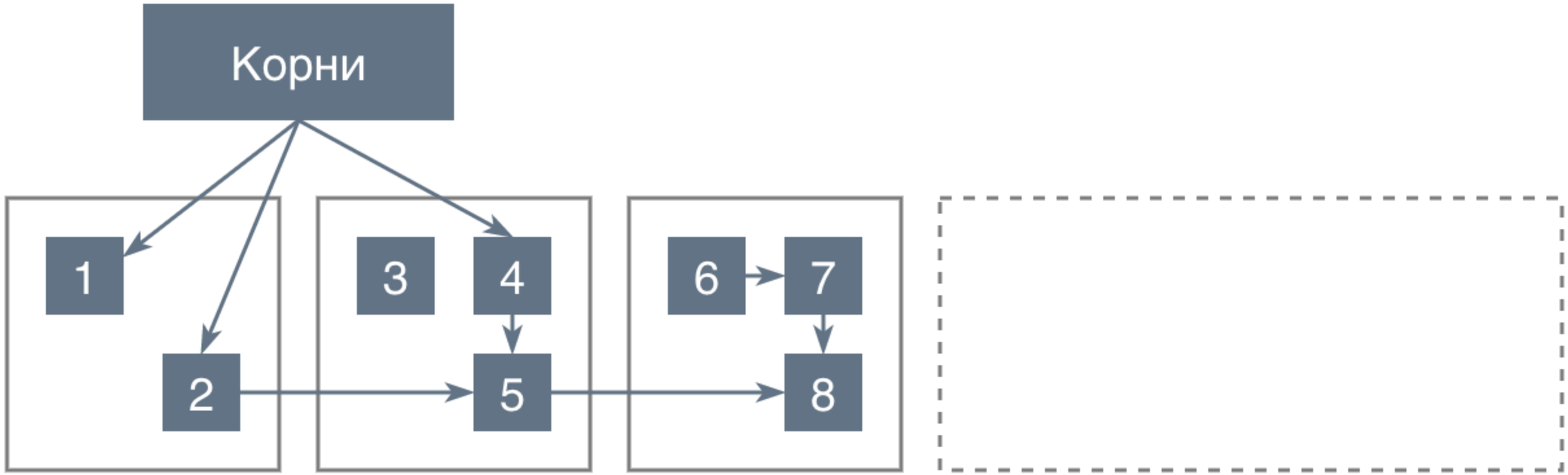
Важные особенности

- Используется во время конкурентных фаз сборки мусора
- Выполняется также в рамках основных потоков приложения

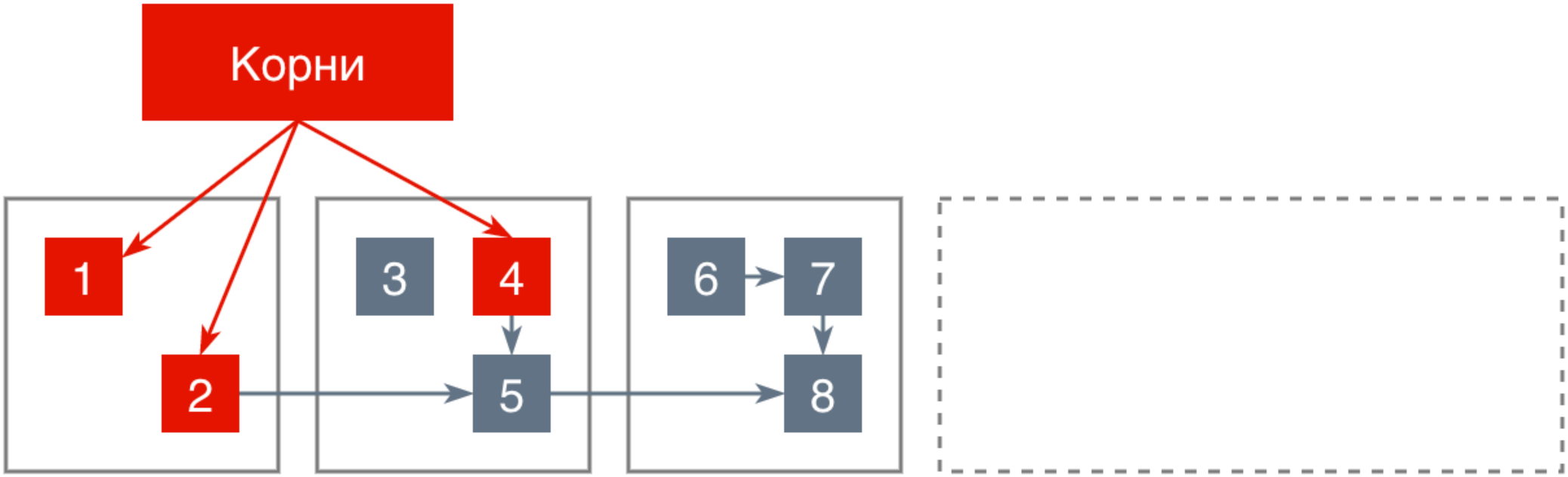
Как работает ZGC?

Этап 1: Поиск живых объектов

Начальное состояние кучи



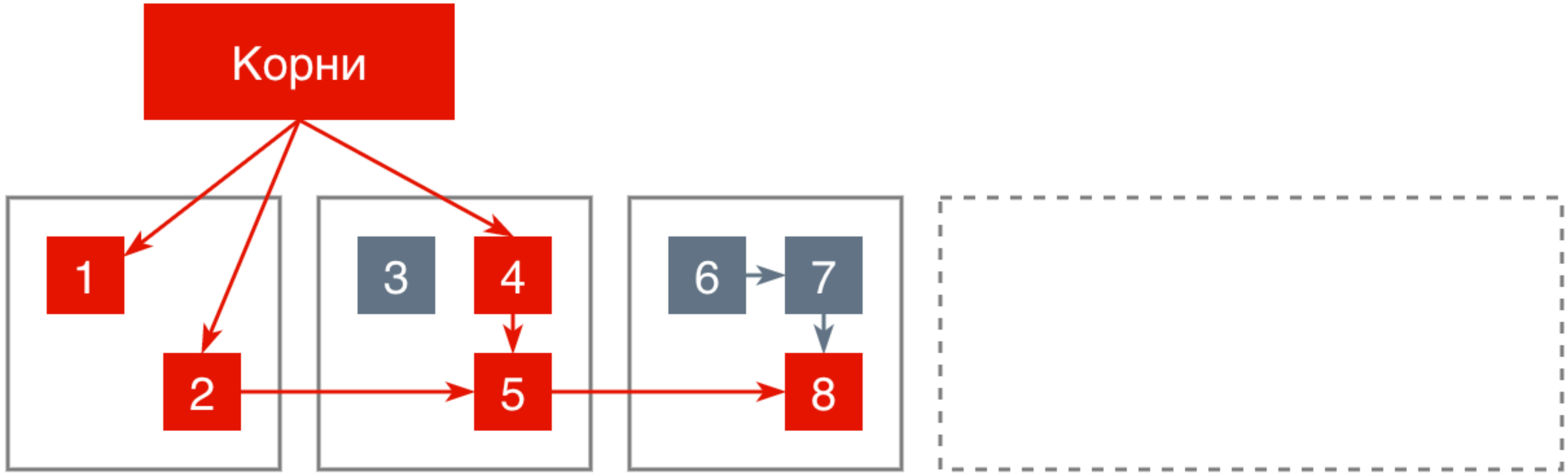
Фаза Pause Mark Start



Фаза Concurrent Map

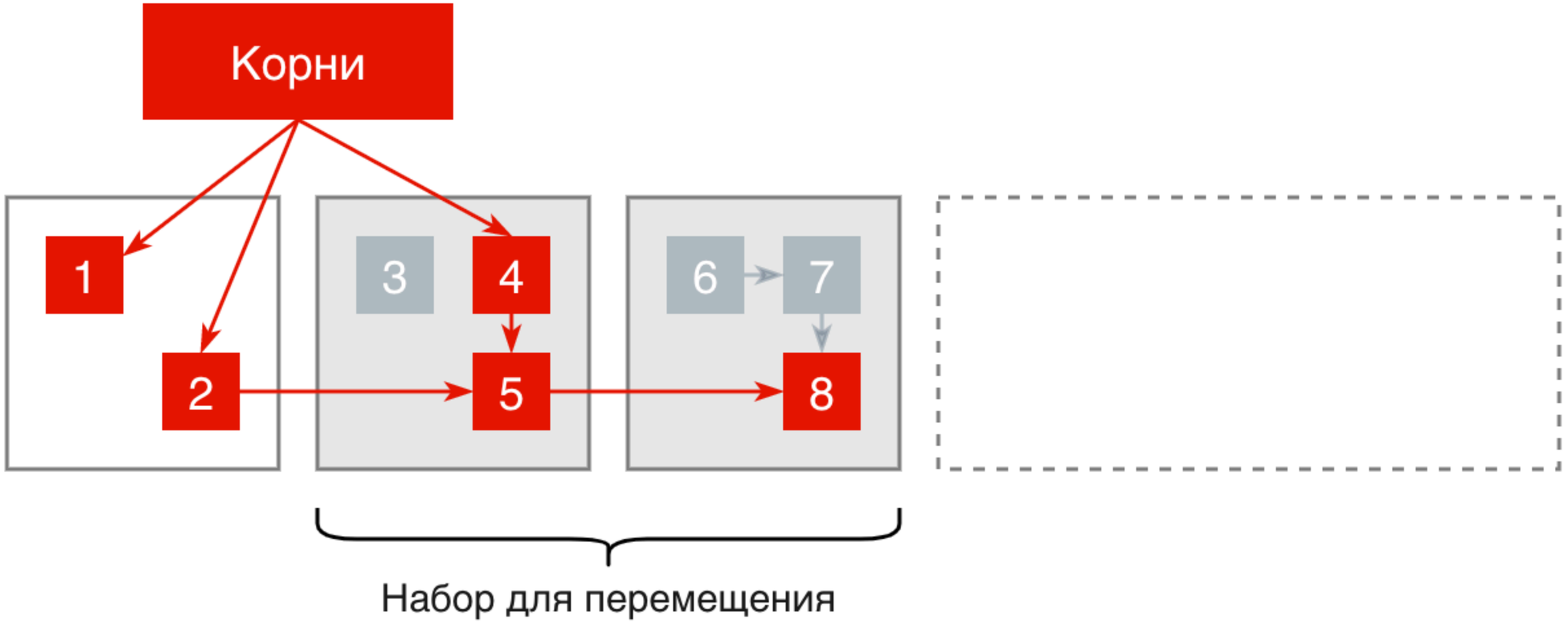
- Продолжается поиск живых объектов, но в concurrent режиме
- В этот период активно используются барьеры
- Барьеры красят все указатели, по которым в это время происходит доступ к объектам

Фаза Pause Mark End

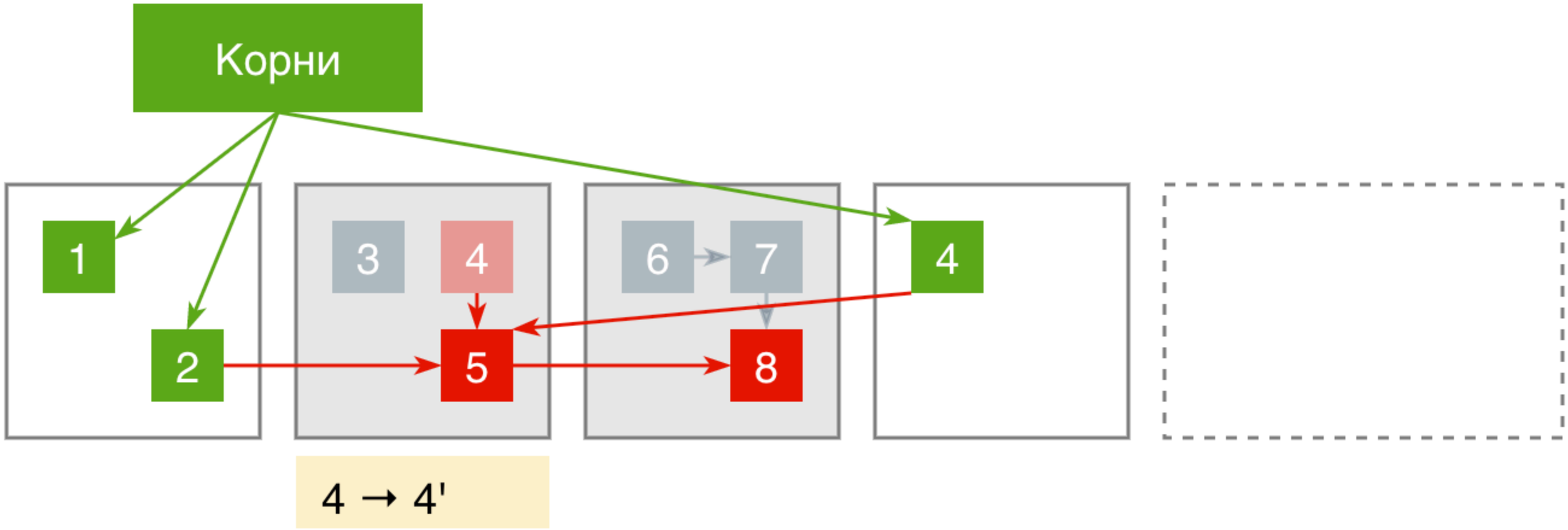


Этап 2: Перемещение

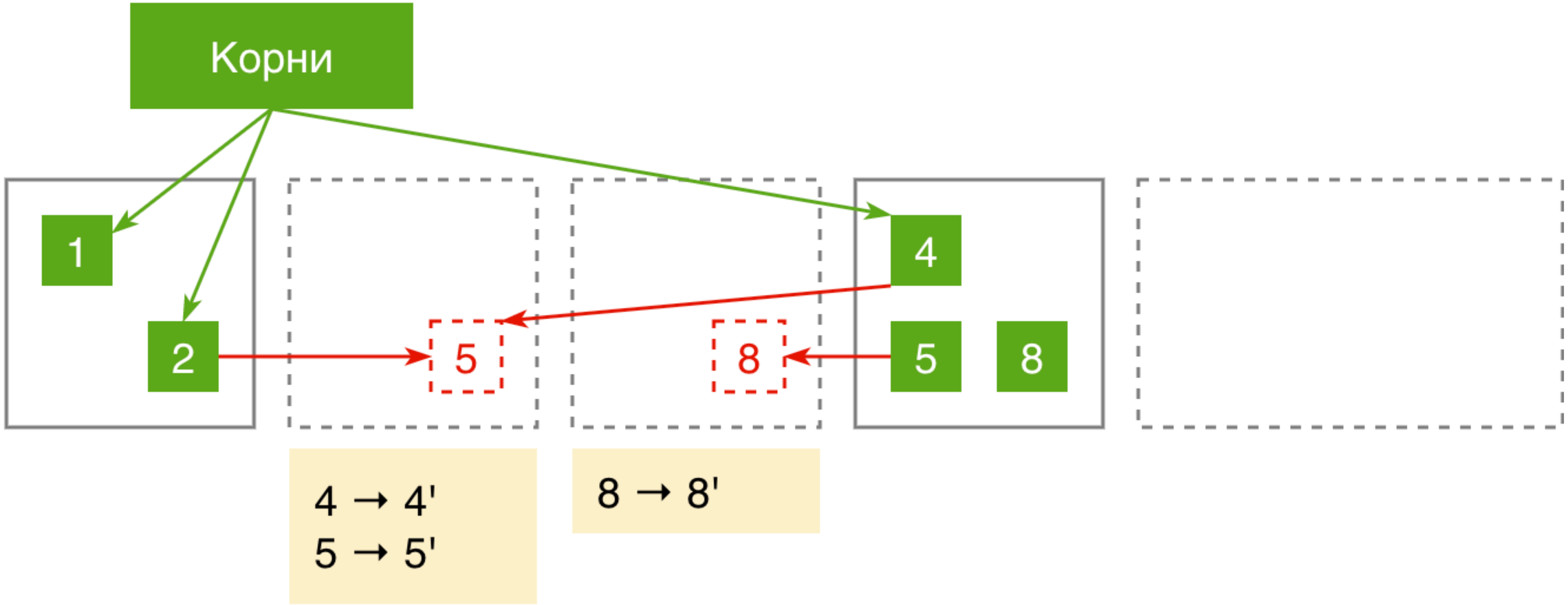
Фаза Concurrent Prepare for Relocate

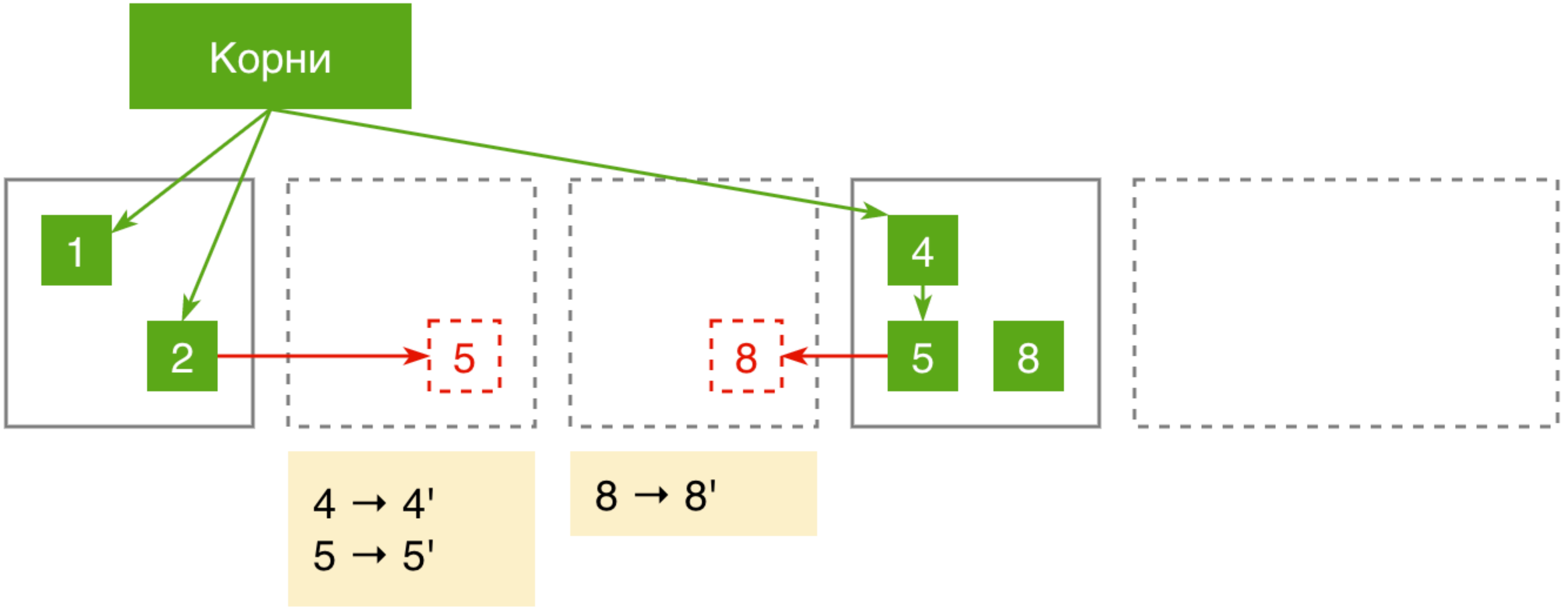


Фаза Pause Relocate Start



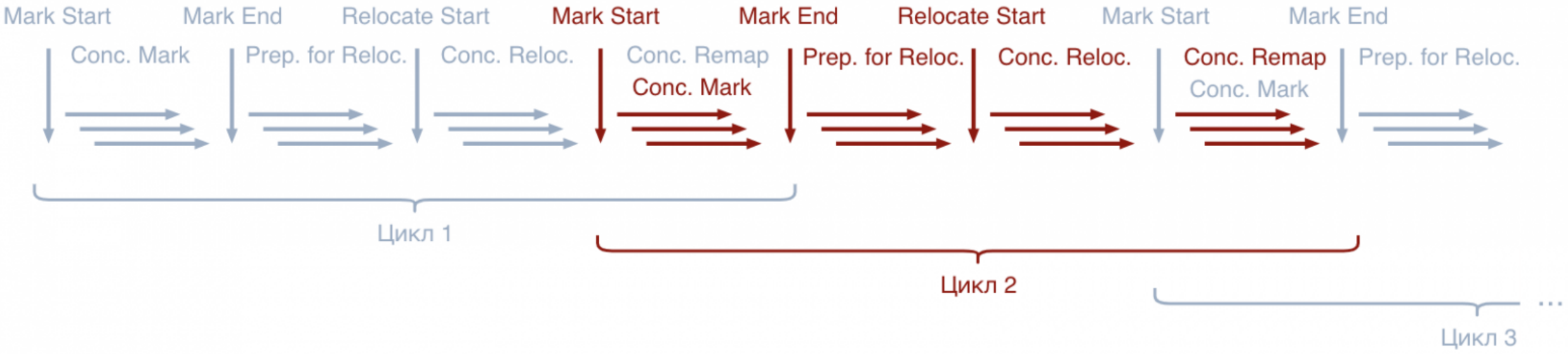
Фаза Concurrent Relocate



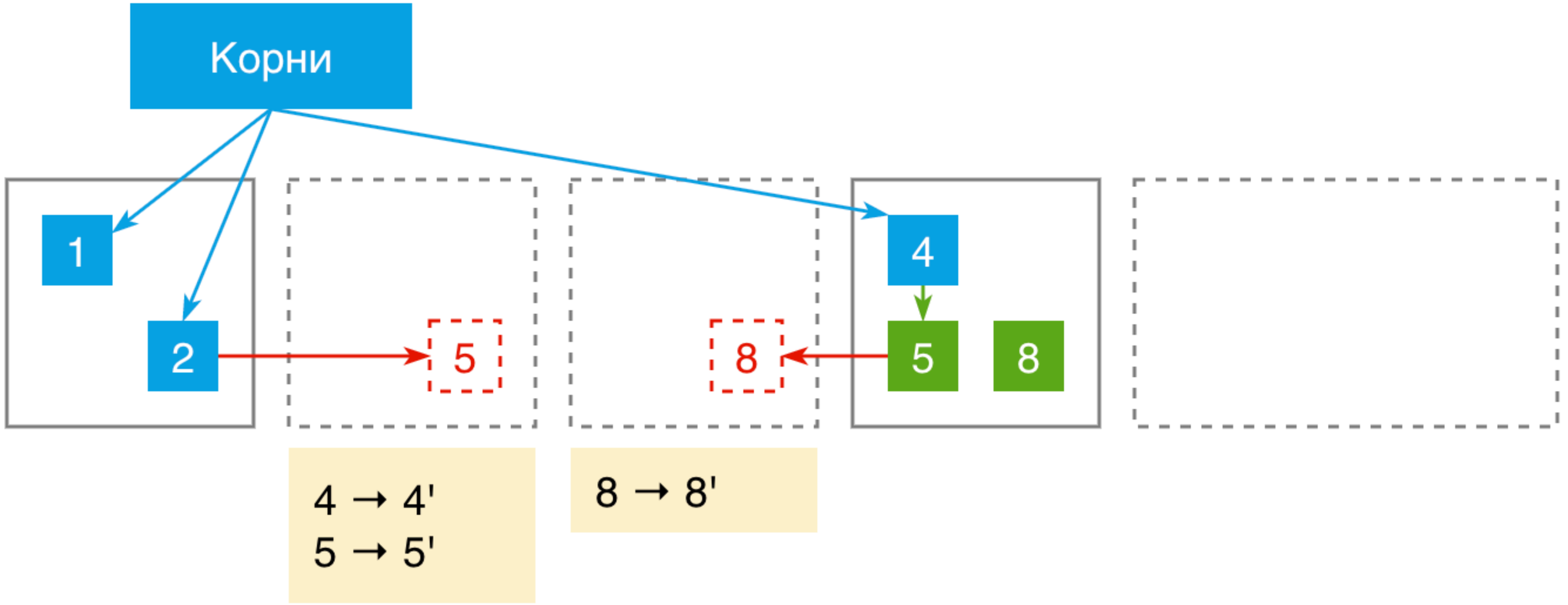

Корни
1
2
5
8
4
5
8
4 → 4'
5 → 5'
8 → 8'

Фаза Concurrent Remap

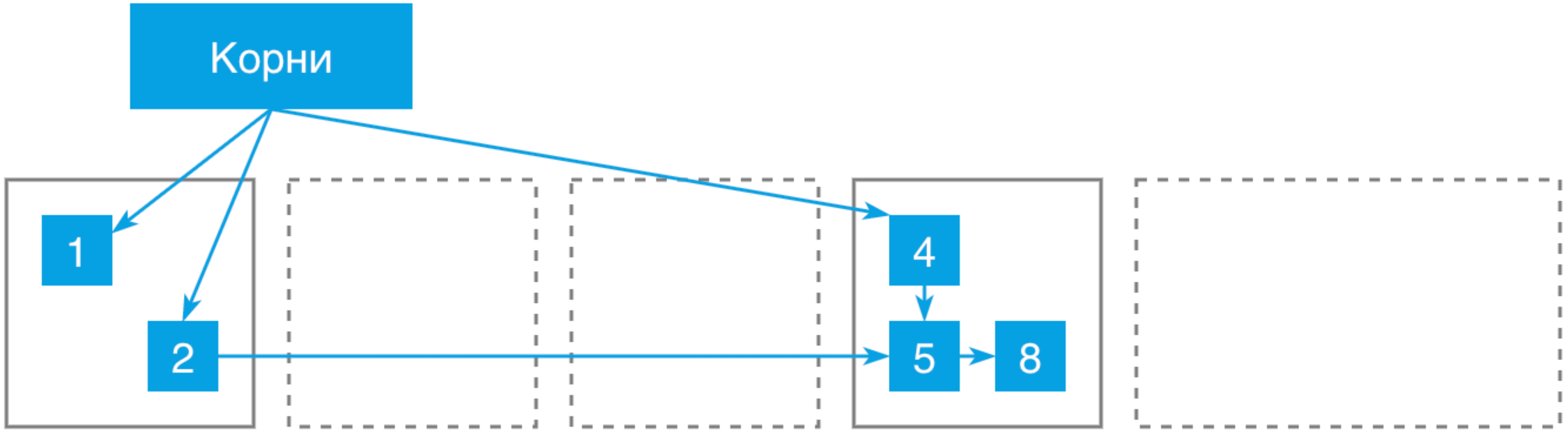
- Все объекты уже оказываются перемещенными в целевые области памяти
- Остались зависшие указатели на объекты в освобожденных регионах памяти
- Чтобы все исправить, нужно совершить еще один обход графа объектов
- Эта фаза совмещается с фазой Concurrent Mark следующего цикла сборки


Mark Start
Conc. Mark
Mark End
Prep. for Reloc.
Relocate Start
Conc. Reloc.
Mark Start
Conc. Remap
Conc. Mark
Mark End
Prep. for Reloc.
Relocate Start
Conc. Reloc.
Mark Start
Conc. Remap
Conc. Mark
Mark End
Prep. for Reloc.
Цикл 1
Цикл 2
Цикл 3
...

Фаза Pause Mark Start следующего цикла сборки



Итог



Достоинства и недостатки

- Позволяет добиться субмиллисекундных пауз
- Даже на очень больших кучах
- Может страдать пропускная способность приложения
- Барьеры совсем не бесплатные
- Требуется большое количество свободных регионов памяти

Epsilon GC

Можно описать коротко - Epsilon GC вообще не собирает мусор

Это как?

- В JVM для размещения новых объектов используются *TLAB'ы* (*thread-local allocation buffers*)

- Для так называемых *громадных объектов* (*humongous objects*), не помещающихся в буфер, в куче запрашиваются блоки памяти специально под них

- Когда потоку не удается получить очередной буффер, то Epsilon GC просто генерирует OutOfMemoryError и завершает процесс.

Достоинства и недостатки 🤨

- Отказ от сборки означает отказ от больших накладных расходов
- Может использоваться в приложениях, которые не мусорят
- Подходит коротко живущим приложения
- Можно использовать для анализа накладных ресурсов других GC

Мы на финишной прямой!


Sh

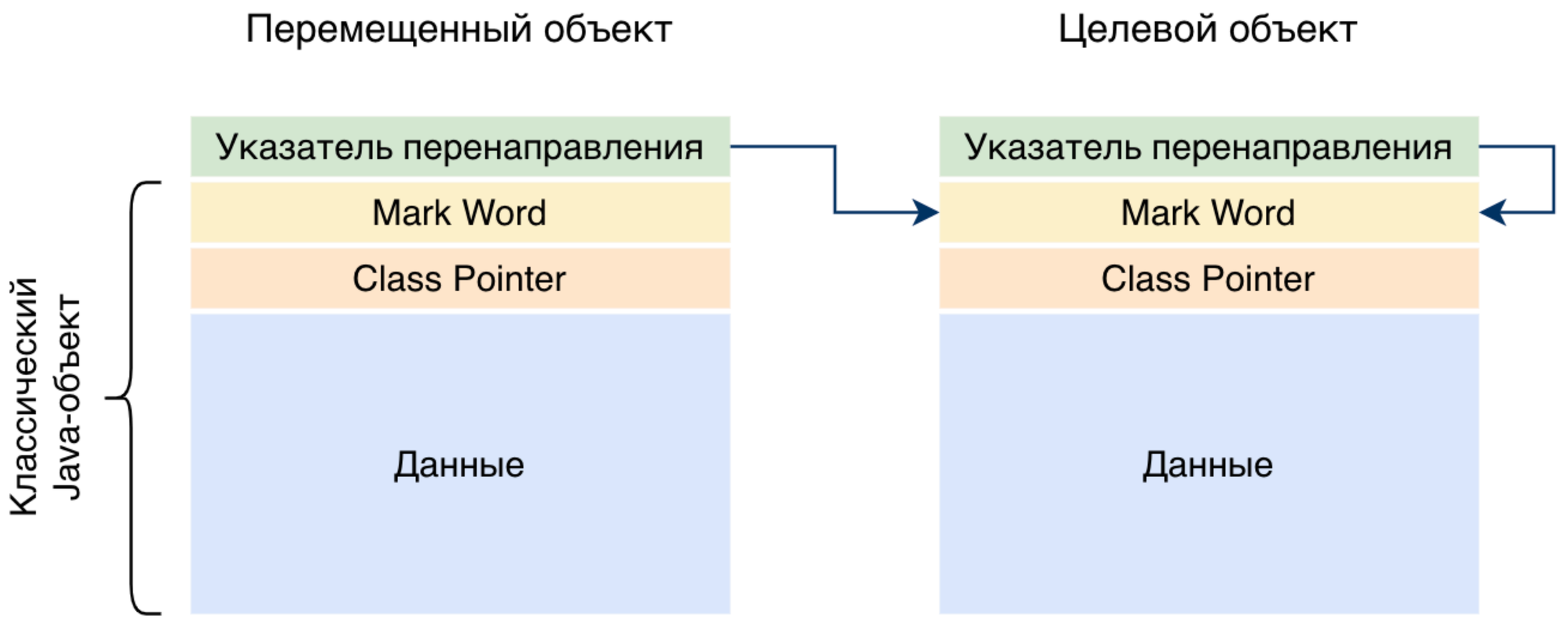
Shenandoah GC

Какие цели у GC?

- Стремится поддерживать короткие паузы на больших кучах
- Стремится выполнять как можно больше работы в concurrent режиме
- Очень схож с ZGC

Указатели перенаправления Брукса

- JVM при размещении объекта в памяти добавляет к нему метаданные
- Shenandoah также добавляет указатель перенаправления
- Указатель на базовый Java объект


Перемещенный объект
Целевой объект
Указатель перенаправления
Mark Word
Class Pointer
Данные
Указатель перенаправления
Mark Word
Class Pointer
Данные
Классический
Java-объект

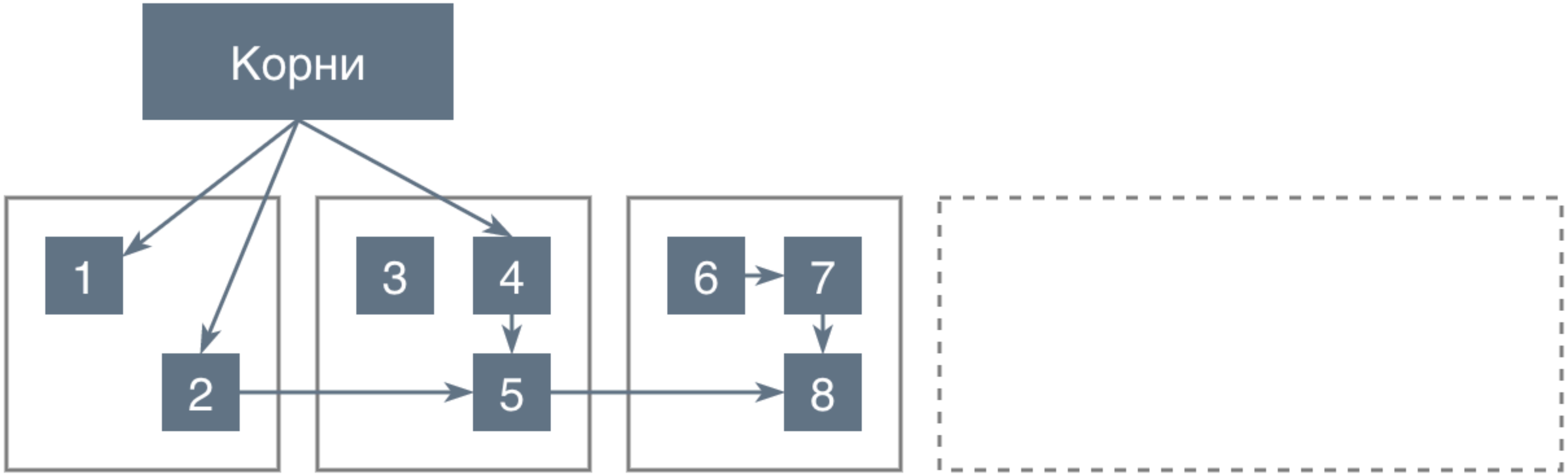
И что особенного в этих указателях?

- При обращении к объекту по указателю в некоторых случаях необходимо совершить дополнительный переход в новое место его размещения
- Перемещение объектов на новое место может осуществляется при работающей программе

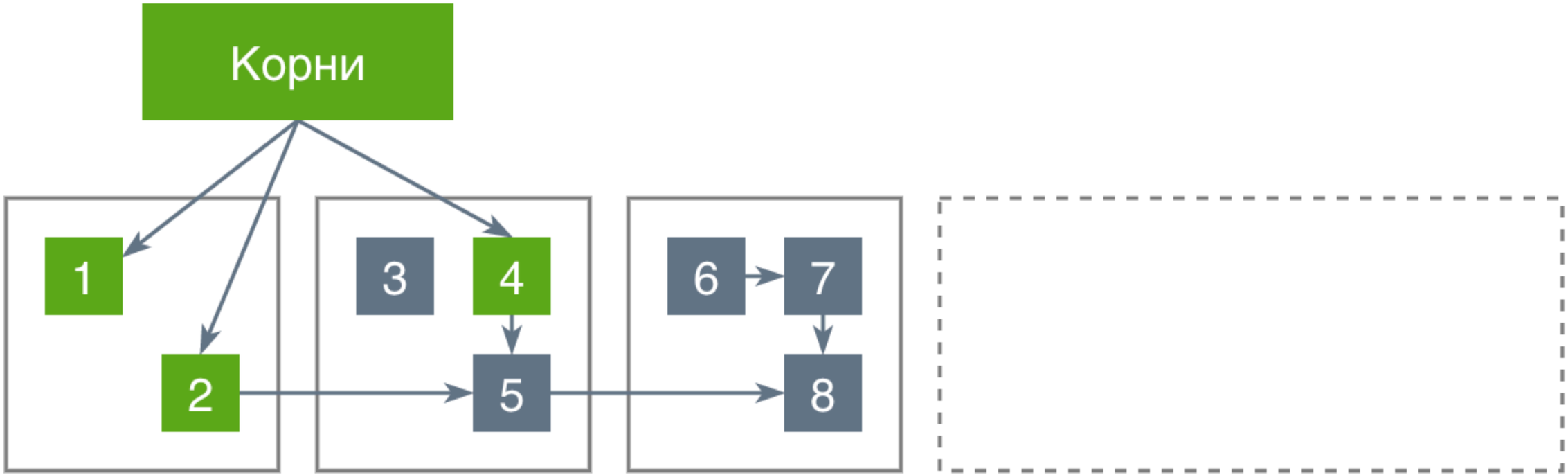
Организация кучи

- Shenandoah разбивает ее на большое количество регионов равных размеров
- Регион может размещать живые объекты и не подлежать очистке
- Может размещать живые объекты и подлежать очистке
- Может быть забронированным под перемещение живых объектов из очищаемых регионов
- Может не использоваться

Поиск живым объектов


Корни
1
2
3
4
5
6
7
8

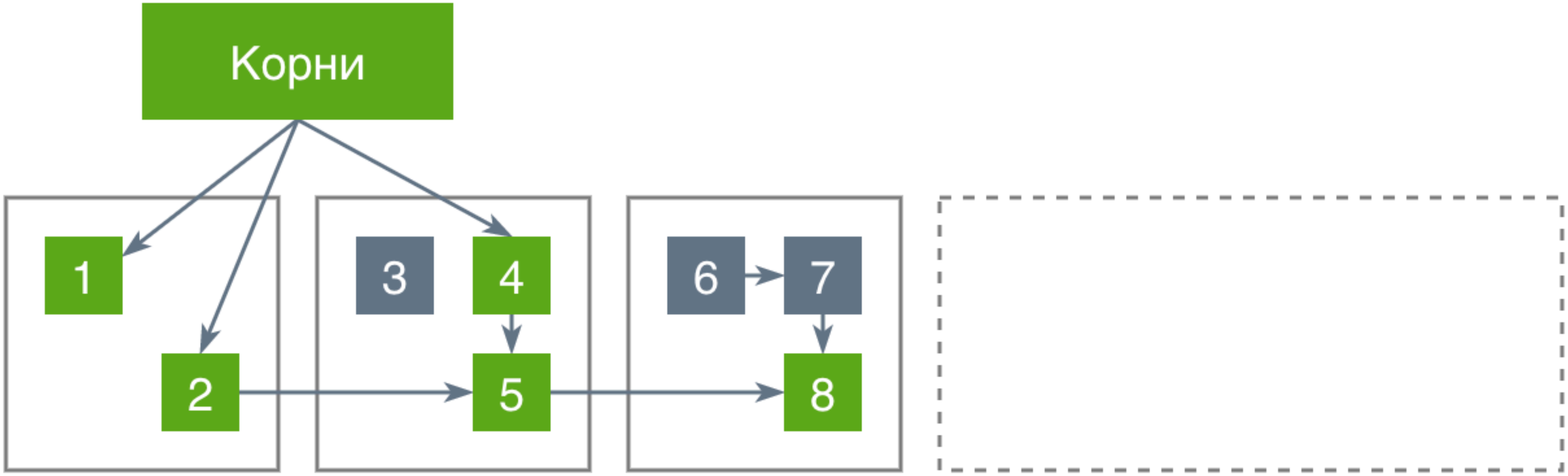
Фаза Init Mark

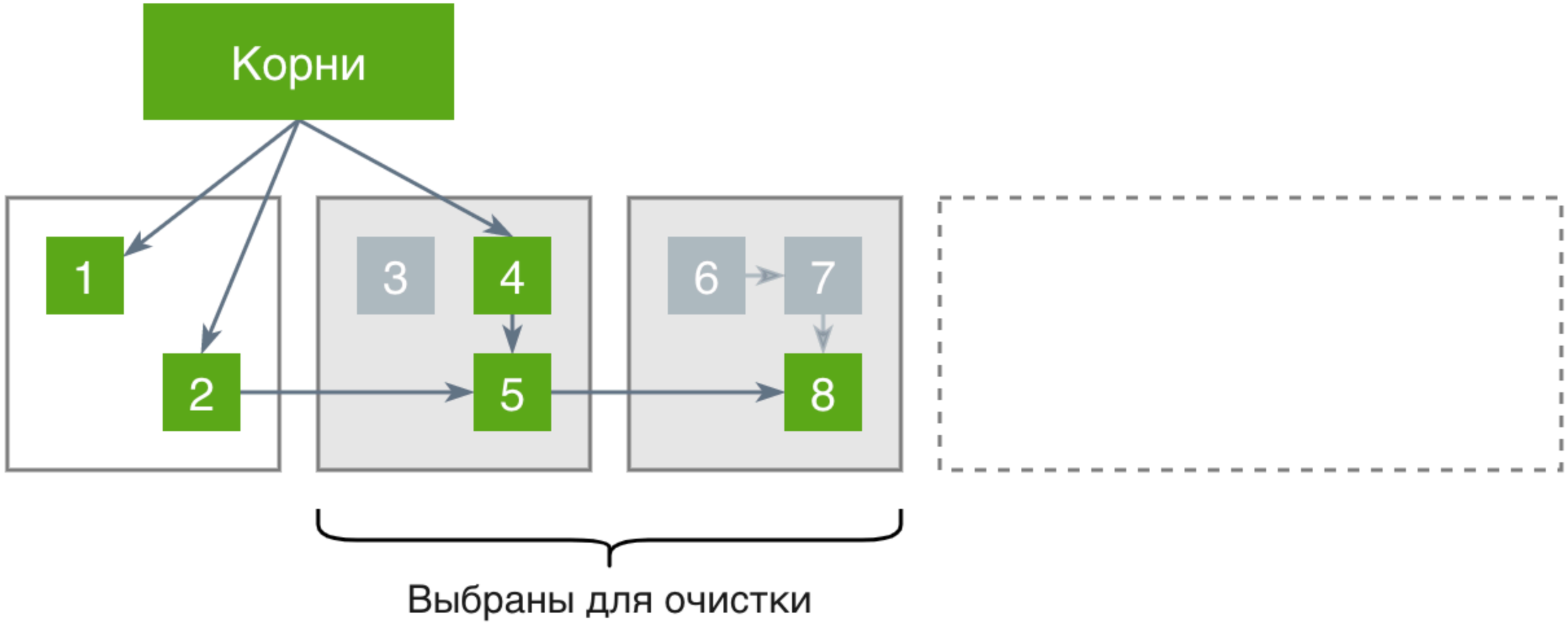


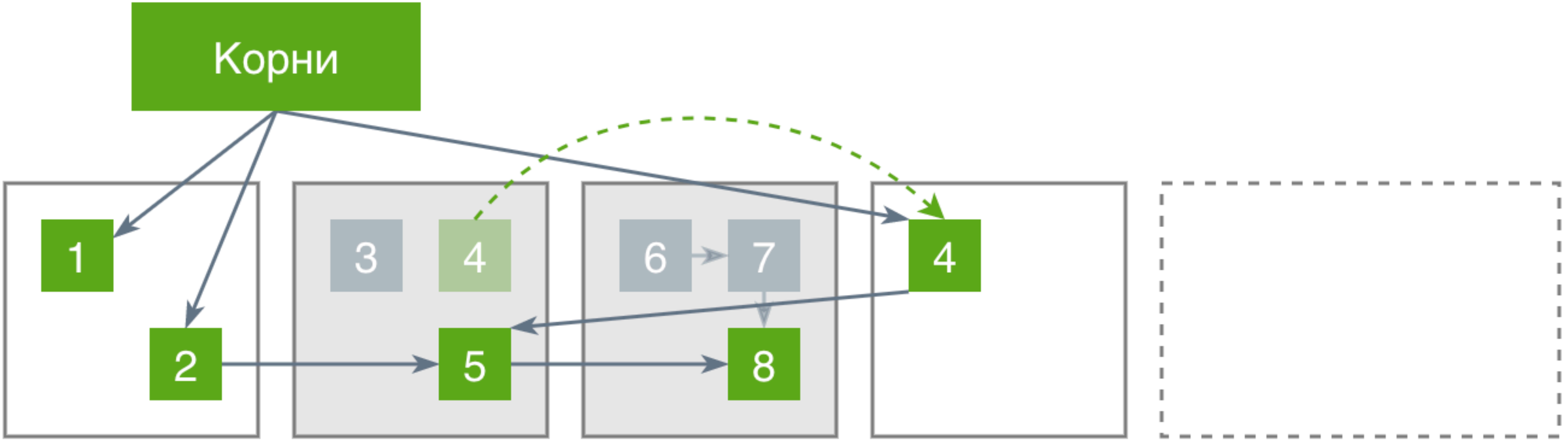
Фаза Concurrent Marking

- Происходит в concurrent режиме
- Происходит обход всей кучи и поиск живых объектов
- Используются функции барьеры

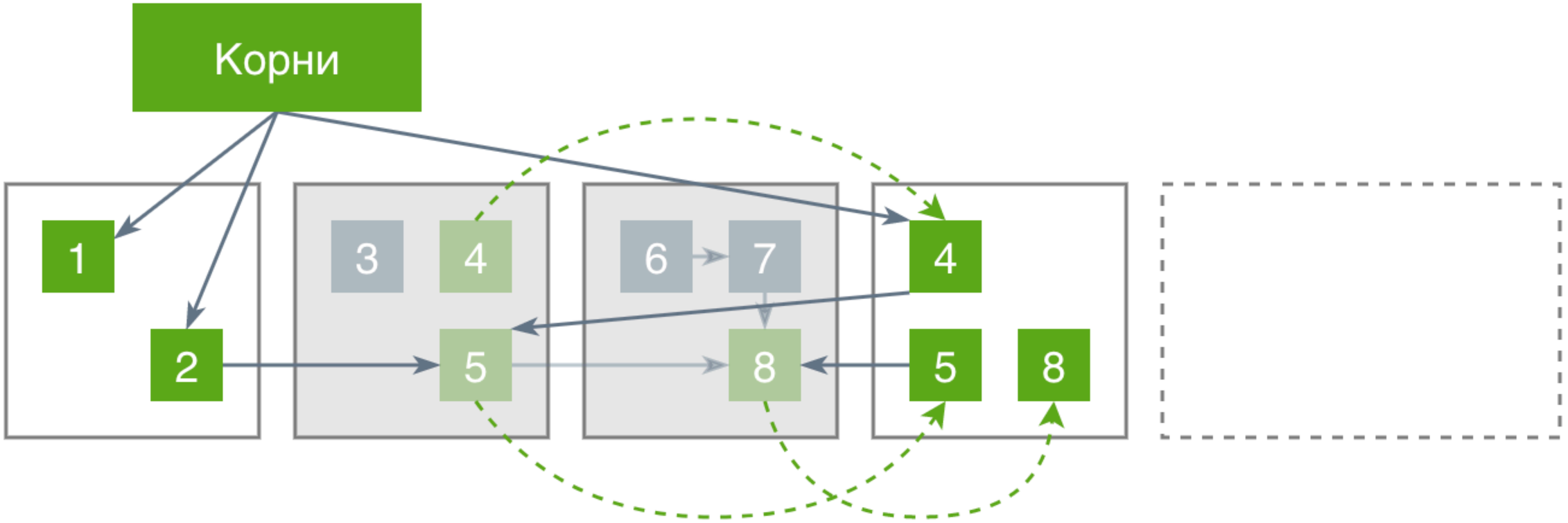
Фаза Final Mark



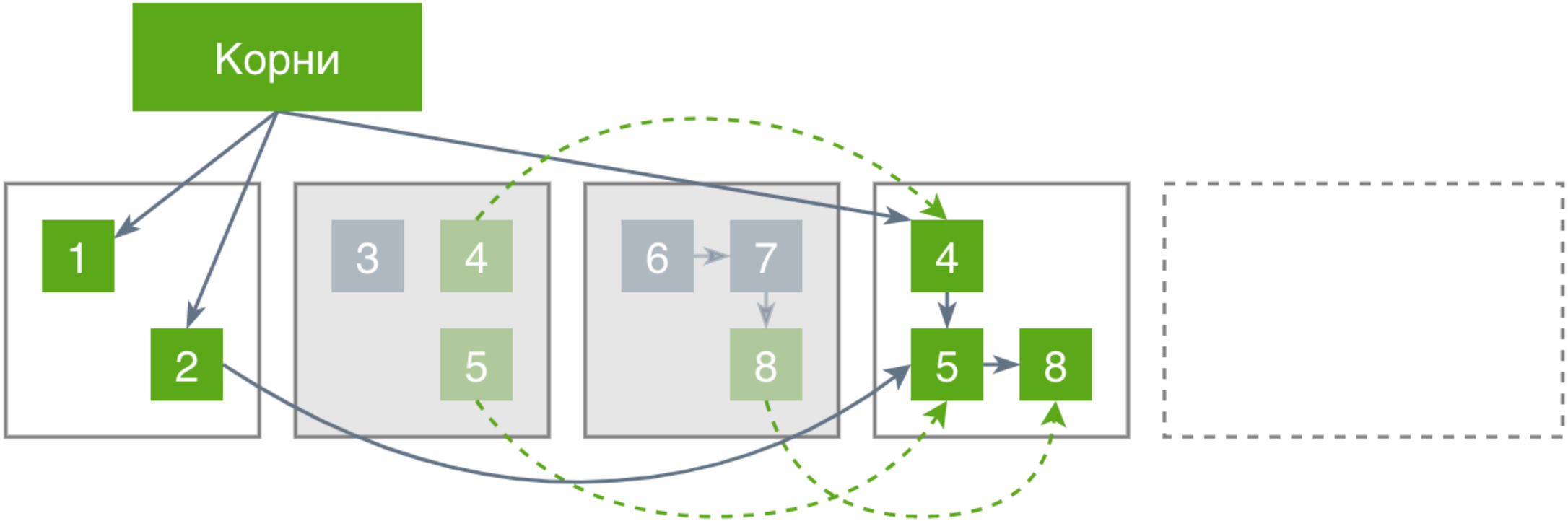

Корни
1
2
3
4
5
6
7
8
Выбраны для очистки


Корни
1
2
3
4
5
6
7
8
4

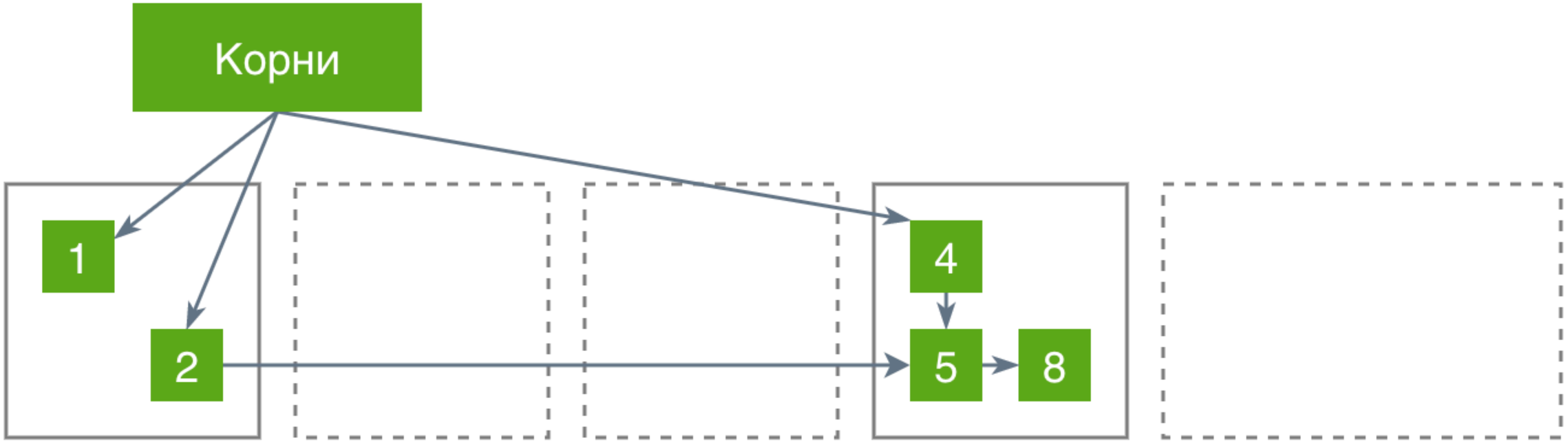
Фаза Concurrent Evacuation



Фаза Concurrent Update Refs



Фаза Final Update Refs



Failure Mode

Что делать если GC не справляется?

- Использовать механизм Pacing
- GC чуть-чуть притормаживает потоки которые аллоцируют память
- Позволяет справится с кратковременными пиками

Преимущества и недостатки

- Очень эффективно разменивает доступные приложению ресурсы на короткие паузы
- Есть стратегия плавной деградации перед сваливанием в Full GC
- Множество настроек
- Повышенное потребление ресурсов

Вывод

Используйте G1 GC

Вопросы?

Материалы будут в README

Спасибо за внимание!