Многопоточное Программирование: Транзакционная память

Роман Елизаров, JetBrains, elizarov@gmail.com
Никита Коваль, JetBrains, ndkoval@ya.ru

ИТМО 2020

ITMO UNIVERSITY

Композиция многопоточных структур

```
class Business {
    val working = ThreadSafeSet<Employee>()
    val vacating = ThreadSafeSet<Employee>()

    operator fun contains(e: Employee) =
        e in working || e in vacating

    fun startVacation(e: Employee) {
        working -= e
        vacating += e
    }
}
```

Композиция многопоточных структур

- Блокировки
  - Грубые блокировки -
    - очень мало параллелизма (здравствуй Амдал!)
  - Тонкие блокировки -
    - необходимость открыть протокол блокировки (инкапсуляция)
    - взаимные блокировки (как обеспечить глобальную иерархию блокировок?)
  - Если есть ожидание / мониторы - ситуация еще хуже

- Алгоритмы без блокировок
  - Эффективный алгоритм для нетривиальный структуры данных - научный результат
  - CASN и универсальная конструкция -- не панацеи

Транзакционный манифест

```
class Business {
    val working = ThreadSafeSet<Employee>()
    val vacating = ThreadSafeSet<Employee>()

    operator fun contains(e: Employee) =
        atomic {
            e in working || e in vacating
        }

    fun startVacation(e: Employee) {
        atomic {
            working -= e
            vacating += e
        }
    }
}
```

Что такое транзакция?

- Классические транзакции - ACID свойства
  - Atomicity
  - Consistency
  - Isolation
  - ~~Durability~~

Почему транзакции?

- Не нужно думать о “порядке блокировок”
  - Просто пиши atomic
- Не нужно думать о “тонкой или толстой блокировке”
  - Просто пиши atomic
- Не нужно изобретать структуры данных без блокировки
  - Просто пиши atomic

- Появляется composability многопоточных абстракций
- Корректные программы намного проще писать

Software Transactional Memory

Software Transactional Memory (STM)

Задачу можно решить чисто программным способом

```
var x: T = initial
```

Software Transactional Memory (STM)

Транзакционные переменные

~~`var x: T = initial`~~

```
val x = TVar<T>(initial)
```

Software Transactional Memory (STM)

Транзакционные переменные

```
var x: T = initial

val x = TVar<T>(initial)



class TVar<T>(initial: T) {
    fun readIn(tx: Transaction): T
    fun writeIn(tx: Transaction, x: T)
}
```

Software Transactional Memory (STM)

Транзакции

```
class Transaction {

    fun <T> TVar<T>.read(): T =
          readIn(this@Transaction)

    fun <T> TVar<T>.write(x: T) =
         writeIn(this@Transaction, x)

    ...
}
```

Software Transactional Memory (STM)

Можем запрограммировать блок **atomic**

```
fun <T> atomic(block: Transaction.() -> T): T {
    ...
}
```

Software Transactional Memory (STM)

И использовать **atomic/read/write**

```
class Foo {
    val a = TVar(1)
    val b = TVar(2)

    fun moveAtoB() = atomic {   // начали
        val t = a.read()        // читаем
        b.write(t)              // пишем
    }                           // закончили
}
```

Software Transactional Memory (STM)

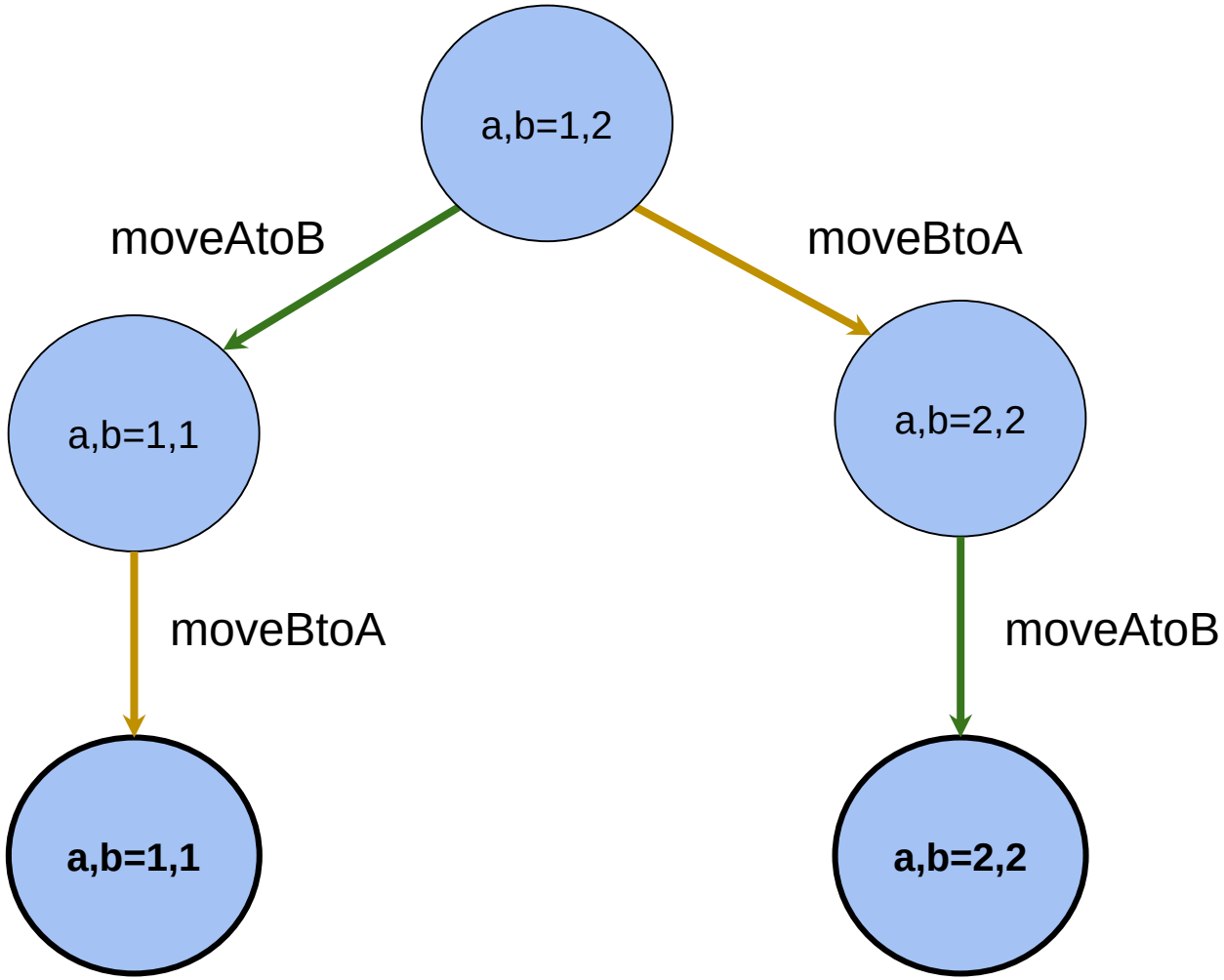
Анатомия блока **atomic**

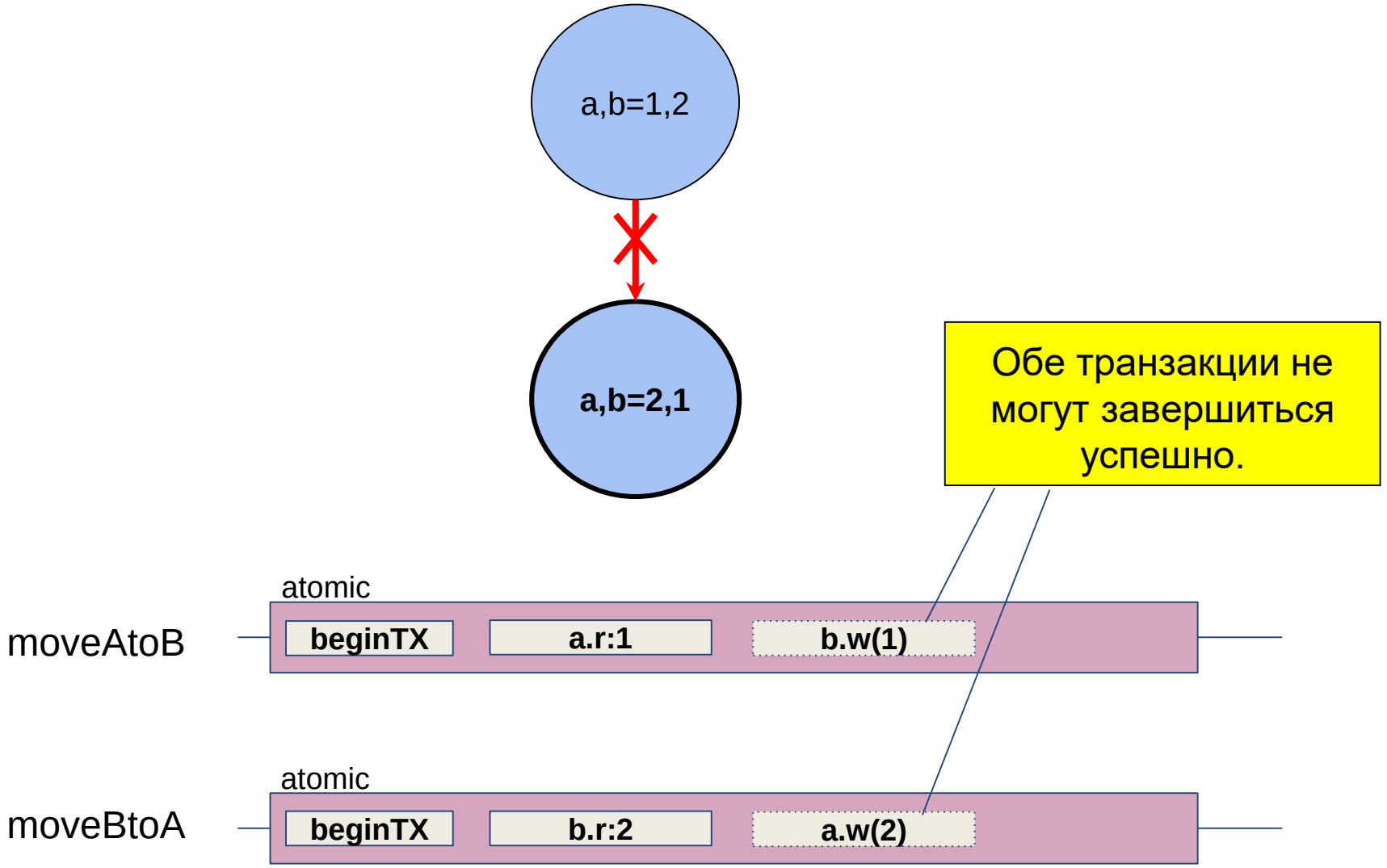
```
fun <T> atomic(block: Transaction.() -> T): T {
    while (true) {
        val transaction = beginTransaction()
        try {
            val result = block(transaction)
            transaction.commit()
            return result
        } catch (e: AbortException) {
            transaction.abort()
        }
    }
}
```

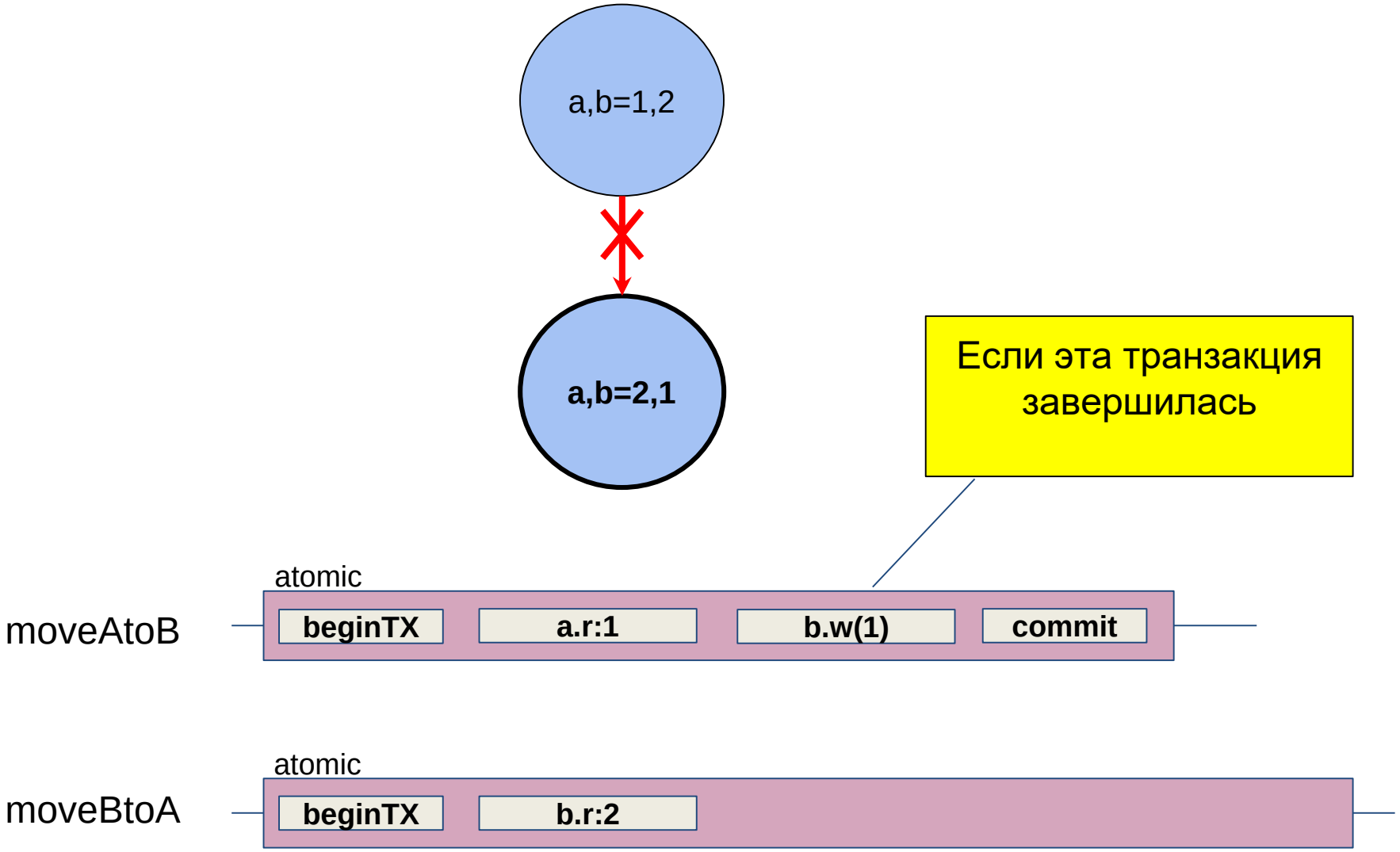
Зачем abort?

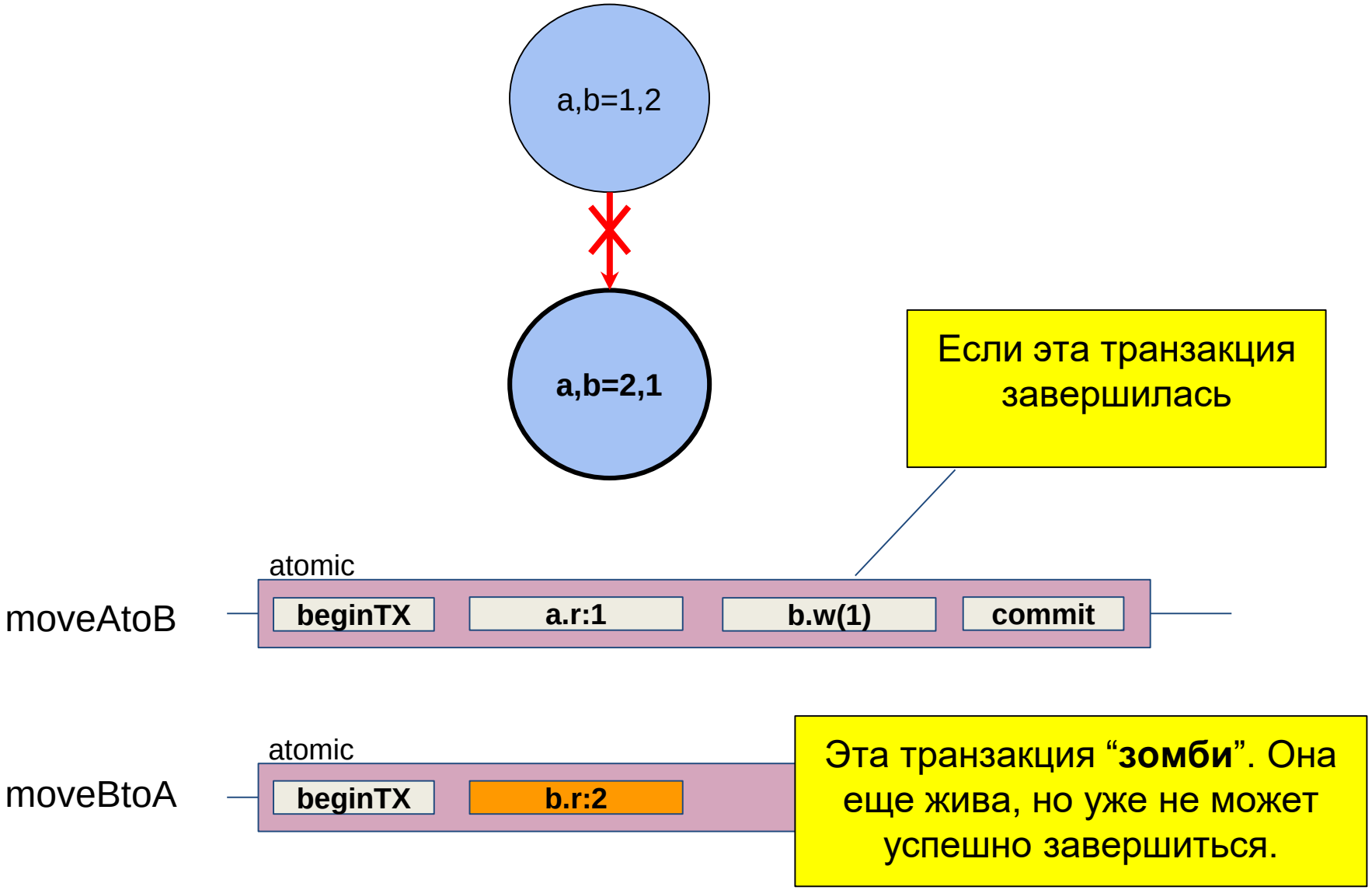
- **STM поддерживающий параллелизм на чтение не может гарантировать прогресс без отмены каких-то транзакций.**

```
class Foo {
    val a = TVar(1)
    val b = TVar(2)

    fun moveAtoB() = atomic {
        val t = a.read()
        b.write(t)
    }

    fun moveBtoA() = atomic {
        val t = b.read()
        a.write(t)
    }
}
```


a,b=1,2
moveAtoB
moveBtoA
a,b=1,1
a,b=2,2
moveBtoA
moveAtoB
a,b=1,1
a,b=2,2


a,b=1,2
a,b=2,1
Обе транзакции не могут завершиться успешно.
atomic
moveAtoB
beginTX
a.r:1
b.w(1)
atomic
moveBtoA
beginTX
b.r:2
a.w(2)


a,b=1,2
a,b=2,1
Если эта транзакция завершилась
atomic
moveAtoB
beginTX
a.r:1
b.w(1)
commit
atomic
moveBtoA
beginTX
b.r:2


a,b=1,2
a,b=2,1
Если эта транзакция завершилась
atomic
moveAtoB
beginTX
a.r:1
b.w(1)
commit
atomic
moveBtoA
beginTX
b.r:2
Эта транзакция “зомби”. Она еще жива, но уже не может успешно завершиться.

Транзакции-зомби

- Работа с несогласованными значениями может плохо кончится
- **Несогласованные** -- нарушающие инвариант

Транзакции зомби

- Работа с несогласованными значениями может плохо кончится
- **Несогласованные** -- нарушающие инвариант

```
class ZombieProblem {
    val a = TVar(1)
    val b = TVar(2)
    // invariant a <= b
```

Транзакции зомби

- Работа с несогласованными значениями может плохо кончится
- **Несогласованные** -- нарушающие инвариант

```
class ZombieProblem {
    val a = TVar(1)
    val b = TVar(2)
    // invariant a <= b

    fun incA() {
        atomic {
            val updateA = a.read() + 1
            a.write(updateA)
            // потом восстановили инвариант
            if (b.read() < updateA) b.write(updateA)
        }
    }
```

Транзакции зомби

- Работа с несогласованными значениями может плохо кончится
- **Несогласованные** -- нарушающие инвариант

```
class ZombieProblem {
    val a = TVar(1)
    val b = TVar(2)
    // invariant a <= b

    fun doSomething() {
        atomic {
            var curA = a.read()
            val curB = b.read()
            while (curA++ != curB) {
                /* something */
            }
    }
```

Транзакции зомби

- Работа с несогласованными значениями может плохо кончится
- **Несогласованные** -- нарушающие инвариант

```
class ZombieProblem {
    val a = TVar(1)
    val b = TVar(2)
    // invariant a <= b

    fun doSomething() {
        atomic {
            var curA = a.read()
            val curB = b.read()
            while (curA++ != curB) {
                /* something */
            }
    }
```

Нельзя допускать несогласованное чтение!

Транзакции зомби

- Работа с несогласованными значениями может плохо кончится
- **Несогласованные** -- нарушающие инвариант

- Транзакционный менеджер должен обнаруживать и не допускать появления транзакций зомби:

  - Заставляя один транзакции ждать завершения других чтобы предотвратить появление транзакций-зомби (*но 100% предотвратить обеспечив параллельность чтения нельзя*)

  - Прерывая транзакции-зомби (**AbortException**)

STM с блокировками

Самый простой STM - с блокировками

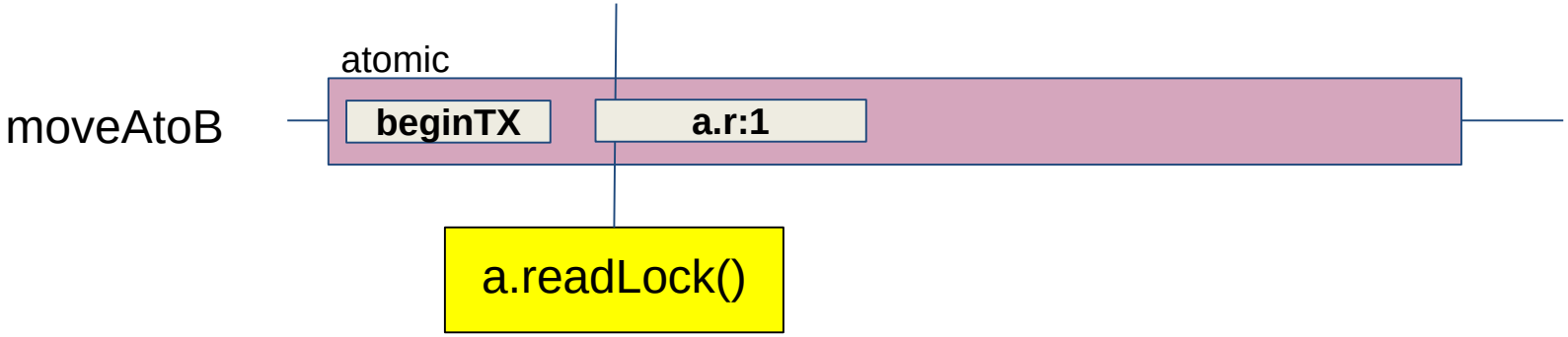
```
class TVar<T>(initial: T) : UpdgradeableLock() {
    var value: T = initial
    var oldValue: Any? = UNDEFINED

    ...
}
```

Идея STM с блокировками

- **Общая логика**

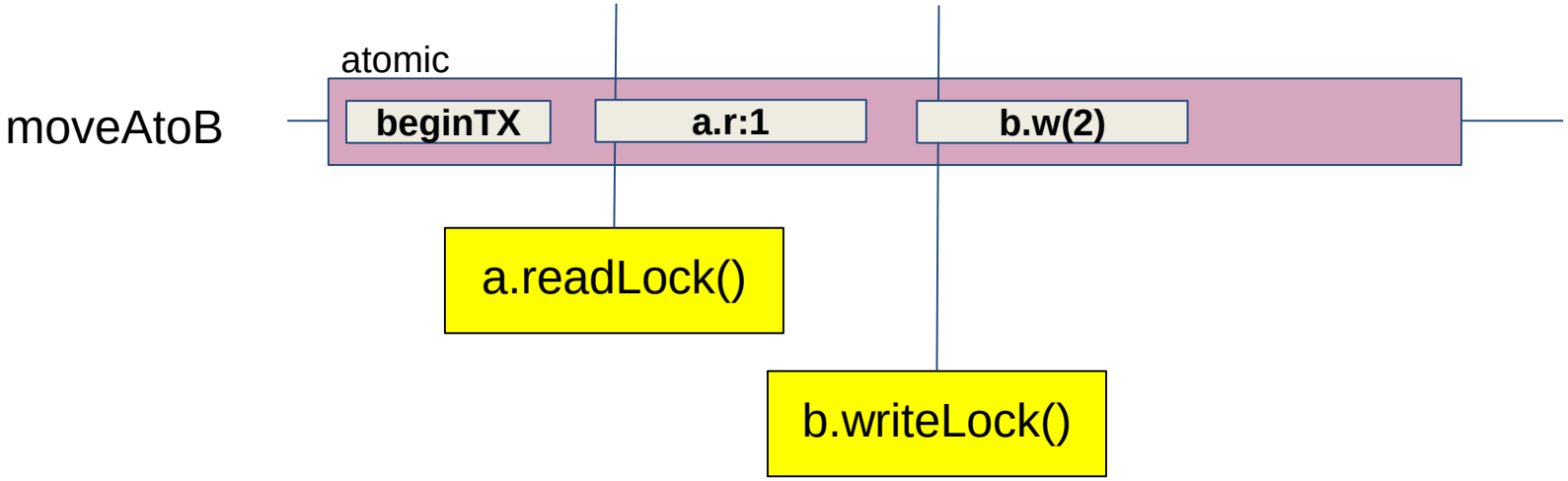
Идея STM с блокировками

- **Общая логика**
  - При вызове read первый раз берем readLock



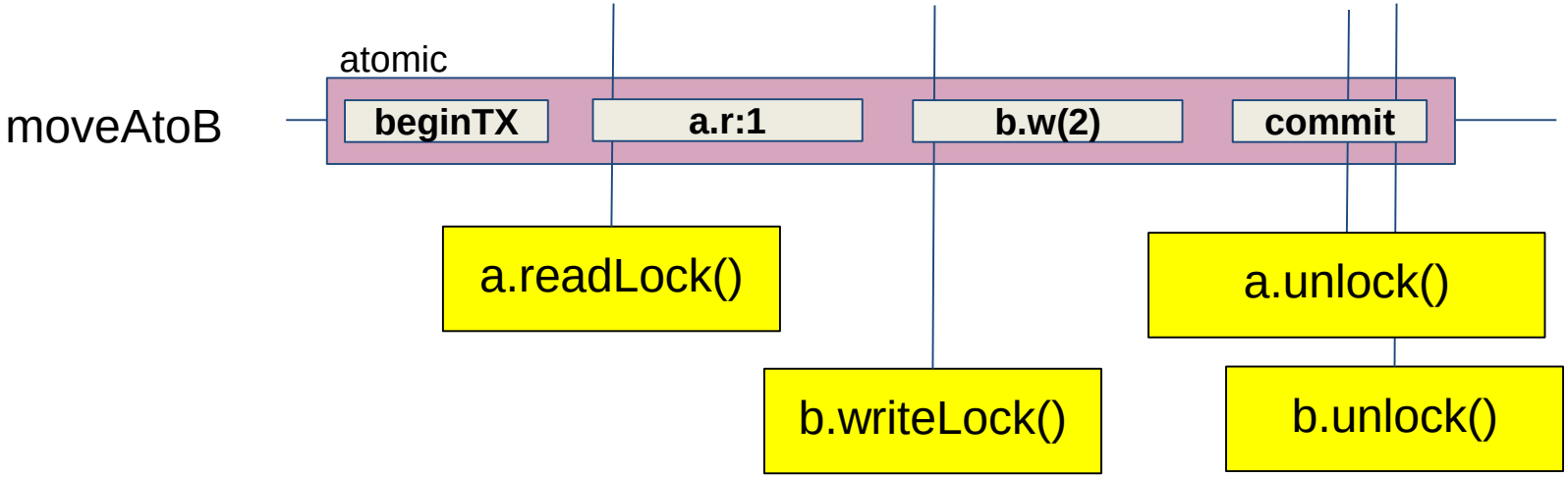
Идея STM с блокировками

- **Общая логика**
  - При вызове read первый раз берем readLock
  - При вызове write первый раз берем writeLock и запоминаем oldValue



Идея STM с блокировками

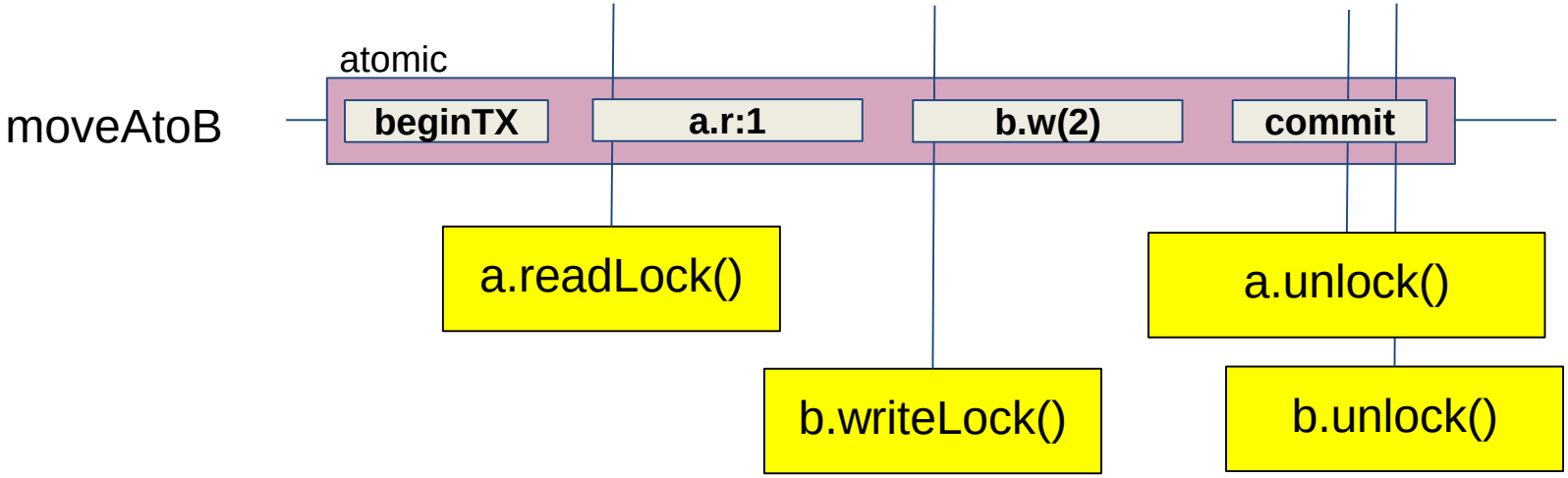
- **Общая логика**
  - При вызове read первый раз берем readLock
  - При вызове write первый раз берем writeLock и запоминаем oldValue
  - Во время commit сбрасываем oldValue во всех записанных значениях и отпускаем все блокировки



Идея STM с блокировками

- **Общая логика**
  - При вызове read первый раз берем readLock
  - При вызове write первый раз берем writeLock и запоминаем oldValue
  - Во время commit сбрасываем oldValue во всех записанных значениях и отпускаем все блокировки

- **Автоматом получаем 2PL => исполнение линеаризуемо**



Транзакция хранит список блокировок

```
enum class LockMode { READ, WRITE }

class Transaction {
    val vars = HashMap<TVar<*>, LockMode>()
```

Транзакция освобождает их при commit/rollback

```
fun commit() {
    for ((v, m) in vars.entries) {
        v.commit(m)
    }
}

fun abort() {
    for ((v, m) in vars.entries) {
        v.abort(m)
    }
}
```

TVar с блокировками

```
fun readIn(tx: Transaction): T {
    takeLockIn(tx, LockMode.READ)
    return value
}
```

TVar с блокировками

```
fun takeLockIn(
    tx: Transaction, mode: LockMode
): LockMode? {
    tx.vars[this]?.let { return it } // уже есть лок?
    lock(mode)                       // возьмем
    tx.vars[this] = mode             // запомним
    return null
}
```

TVar с блокировками

```
fun writeIn(tx: Transaction, x: T) {
    if (takeLockIn(tx, LockMode.WRITE) == LockMode.READ) {
        // has read --> updgrade
        upgradeLock()
        tx.vars[this] = LockMode.WRITE
    }
    if (oldValue === UNDEFINED) oldValue = value
    value = x
}
```

TVar: commit/rollback

```
fun commit(mode: LockMode) {
    oldValue = UNDEFINED
    unlock(mode)
}

fun abort(mode: LockMode) {
    if (mode == LockMode.WRITE) value = oldValue as T
    unlock(mode)
}
```

Запись более подробно

a

lock	---
value	1
oldValue	UNDEF

Запись более подробно

a		**rd: 1**
lock	---	READ
value	1	1
oldValue	UNDEF	UNDEF

Запись более подробно

a		rd: 1	wr: 2
lock	---	READ	WRITE
value	1	1	2
oldValue	UNDEF	UNDEF	1

Upgrade

Undo Log

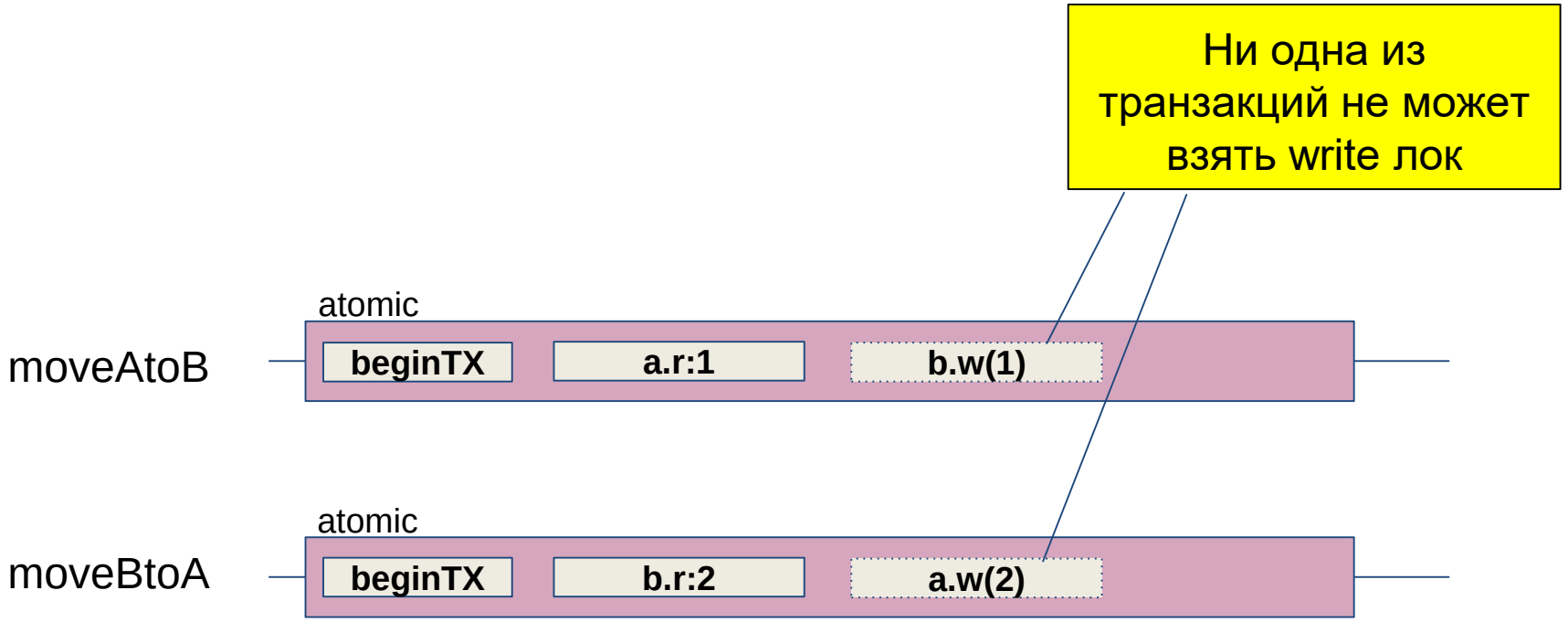
Запись более подробно

a		rd: 1	wr: 2	commit
lock	---	READ	WRITE	---
value	1	1	2	2
oldValue	UNDEF	UNDEF	1	UNDEF

Запись более подробно

a		rd: 1	wr: 2	abort
lock	---	READ	WRITE	---
value	1	1	2	1
oldValue	UNDEF	UNDEF	1	UNDEF

А что если так?



Deadlock

- Нужно реализовать **deadlock detector**
  - В простейшем случае -- ждать лока не более определенного времени
- В случае обнаружения взаимной блокировки надо одну из транзакций отменить (**AbortException**)

Deadlock

- Нужно реализовать **deadlock detector**
  - В простейшем случае -- ждать лока не более определенного времени
- В случае обнаружения взаимной блокировки надо одну из транзакций отменить (**AbortException**)

- Полезно иметь **deadlock avoidance**
  - Заранее брать write lock если транзакция планирует писать

Анализ STM с блокировками

- **Как тонкая блокировка**
  - Можно сделать любую “гранулярность” защиты (на поле, на объект, на более сложную структура)
  - Те же условные условия прогресса и переключение контекстов когда наткнулись на “занятую” блокировку

- **Преимущества**
  - Программисту не нужно думать о порядке блокировок
    - Если что не так, то будет “прозрачный” **abort** и повтор операции
  - Работает композиция
    - Можно написать **atomic** на уровне сверху, укрупняя транзакцию, не заводя новых блокировок и не нарушая инкапсуляцию

STM без блокировок

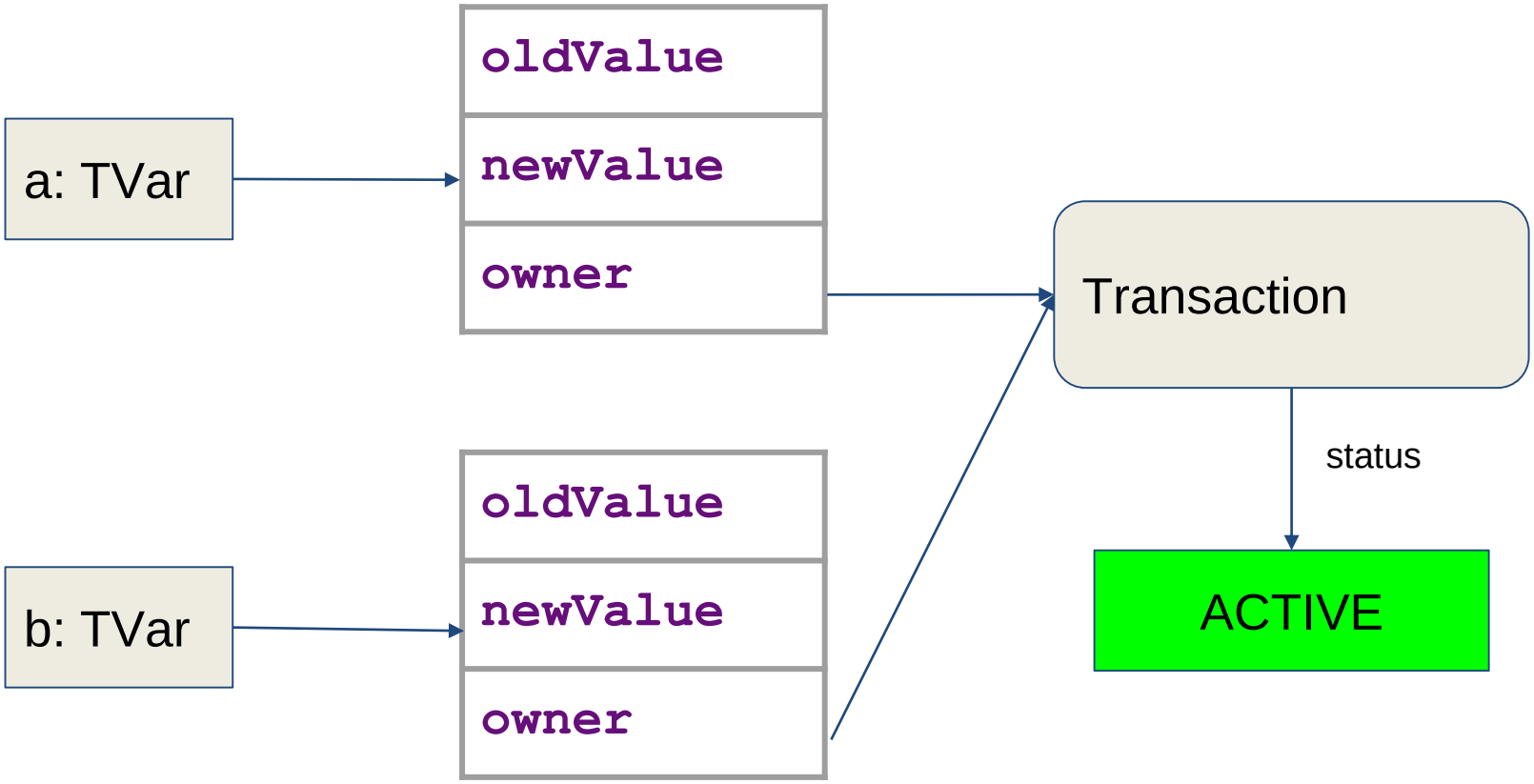
Транзакция

```
enum class TxStatus { ACTIVE, COMMITTED, ABORTED }

class Transaction {
    val status = AtomicReference(TxStatus.ACTIVE)
```

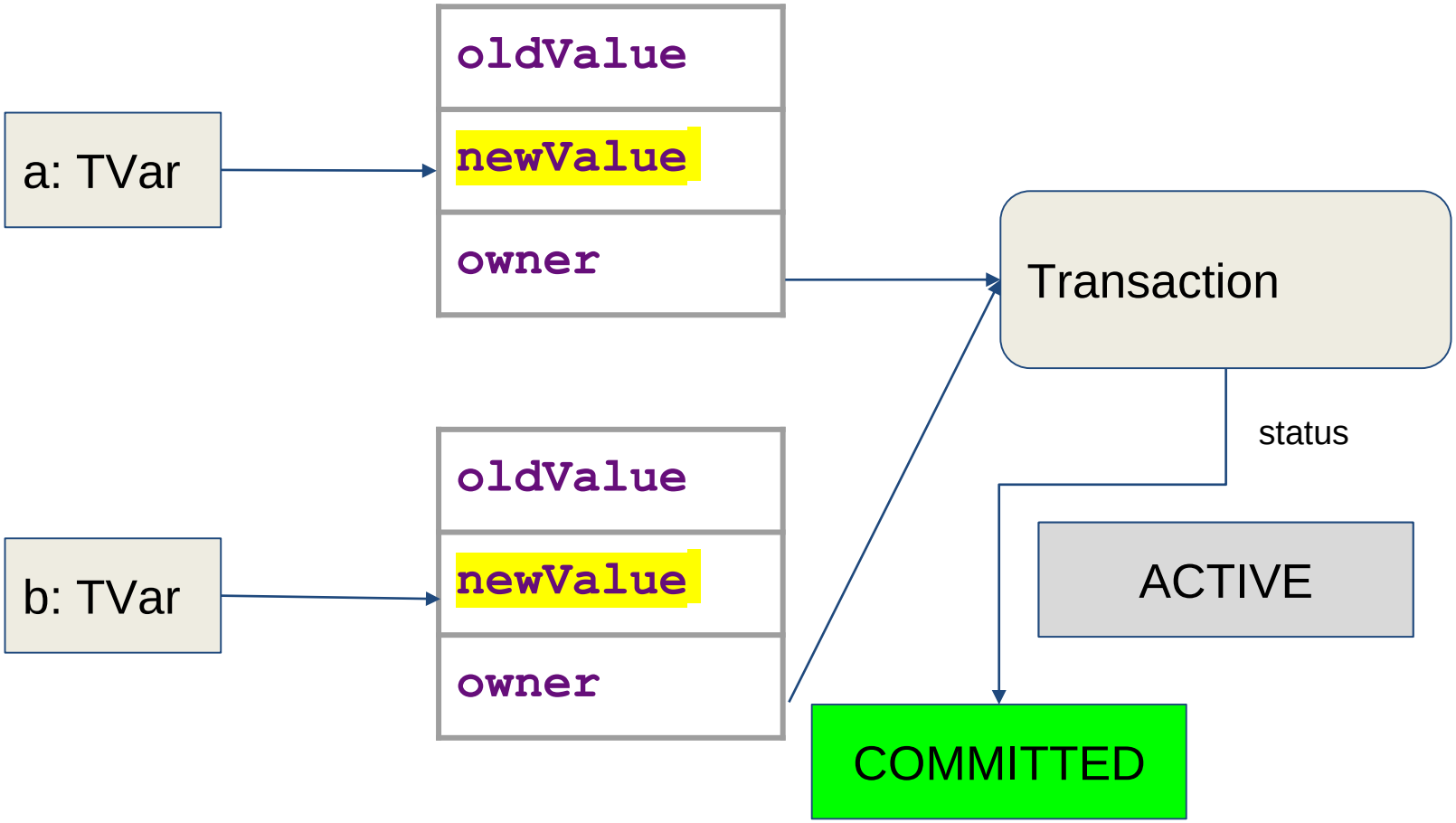
Транзакция

```
enum class TxStatus { ACTIVE, COMMITTED, ABORTED }

class Transaction {
    val status = AtomicReference(TxStatus.ACTIVE)

    fun commit(): Boolean =
        status.compareAndSet(
            TxStatus.ACTIVE, TxStatus.COMMITTED)

    fun abort() {
        status.compareAndSet(
            TxStatus.ACTIVE, TxStatus.ABORTED)
    }
```

Идея

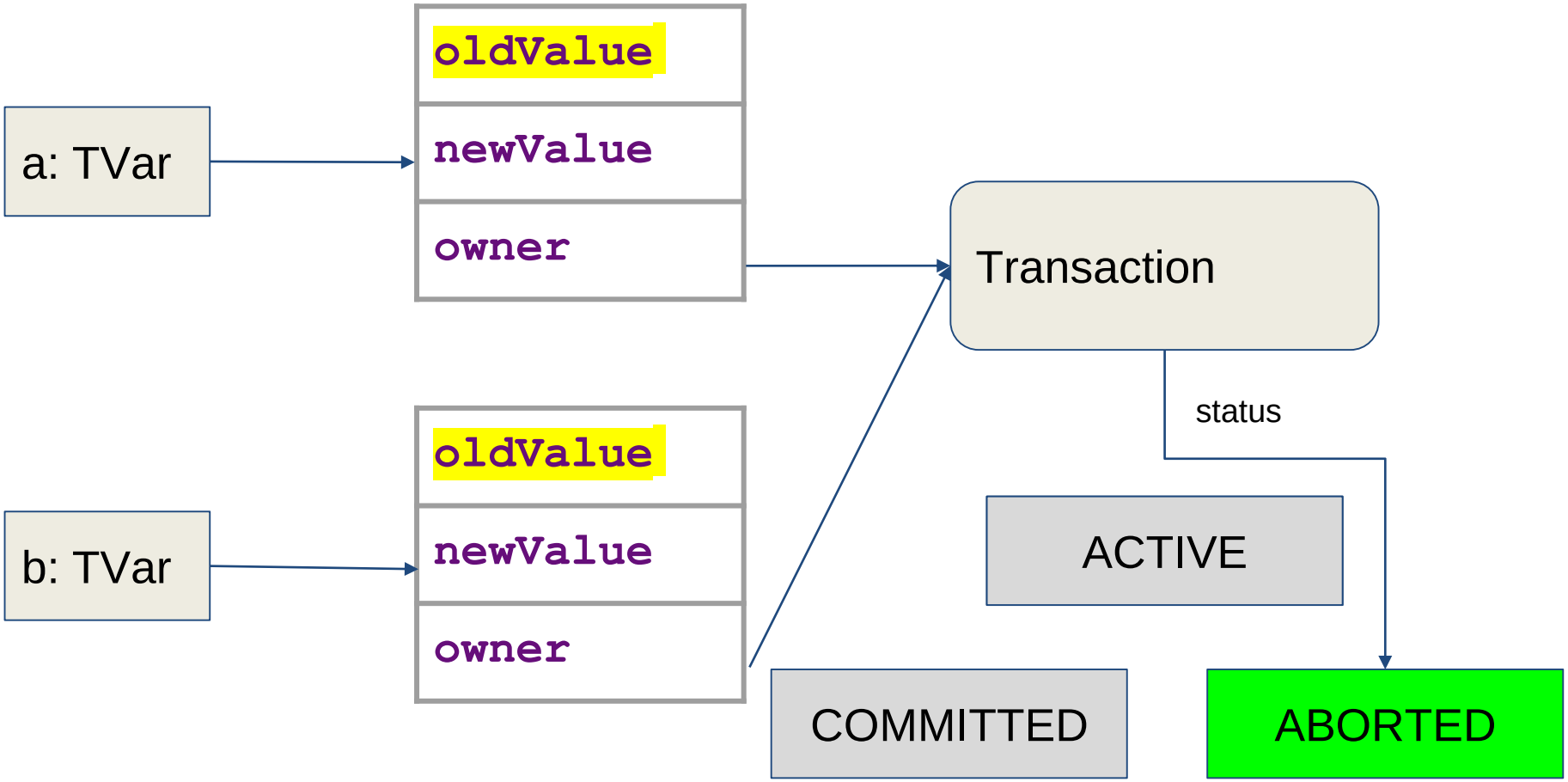

a: TVar
oldValue
newValue
owner
b: TVar
oldValue
newValue
owner
Transaction
status
ACTIVE

Идея



Линеаризация всех изменений в момент успешного CAS(ACTIVE,COMMITTED)

Идея


a: TVar
b: TVar
oldValue
newValue
owner
oldValue
newValue
owner
Transaction
status
ACTIVE
COMMITTED
ABORTED

Транзакционные переменные

```
class TVar<T>(initial: T) {
    private val loc = AtomicReference(...)
}
```

Транзакционные переменные

```
class TVar<T>(initial: T) {
    private val loc = AtomicReference(
        Loc<T>(initial, initial, rootTx)
    )
}

class Loc<T>(
    val oldValue: T,
    val newValue: T,
    val owner: Transaction
)

private val rootTx = Transaction().apply { commit() }
```

Узнать текущее значение

```
class Loc<T>(...) {
    fun valueIn(tx: Transaction,
                onActive: (Transaction) -> Unit): Any? =
        if (owner === tx) newValue else
            ...
    }
}
```

Узнать текущее значение

```
class Loc<T>(...) {
    fun valueIn(tx: Transaction,
                onActive: (Transaction) -> Unit): Any? =
        if (owner === tx) newValue else
            when (owner.status.get()!!) {
                TxStatus.ABORTED -> oldValue
                ...
            }
    }
}
```

Узнать текущее значение

```
class Loc<T>(...) {
    fun valueIn(tx: Transaction,
                onActive: (Transaction) -> Unit): Any? =
        if (owner === tx) newValue else
            when (owner.status.get()!!) {
                TxStatus.ABORTED -> oldValue
                TxStatus.COMMITTED -> newValue
                ...
            }
    }
}
```

Узнать текущее значение

```
class Loc<T>(...) {
    fun valueIn(tx: Transaction,
                onActive: (Transaction) -> Unit): Any? =
        if (owner === tx) newValue else
            when (owner.status.get()!!) {
                TxStatus.ABORTED -> oldValue
                TxStatus.COMMITTED -> newValue
                TxStatus.ACTIVE -> {
                    onActive(owner)
                    TxStatus.ACTIVE
                }
            }
    }
}
```

“Открываем” переменную при любой операции

```
class TVar<T> {
    fun openIn(tx: Transaction, update: (T) -> T): T {
        while (true) {
            val curLoc = loc.get()
            ...
        }
    }
}
```

“Открываем” переменную при любой операции

```
class TVar<T> {
    fun openIn(tx: Transaction, update: (T) -> T): T {
        while (true) {
            val curLoc = loc.get()
            val curValue = curLoc.valueIn(tx) { … }
        }
    }
}
```

“Открываем” переменную при любой операции

```
class TVar<T> {
    fun openIn(tx: Transaction, update: (T) -> T): T {
        while (true) {
            val curLoc = loc.get()
            val curValue = curLoc.valueIn(tx) { owner ->
                contention(tx, owner)
            }
        }
    }
}
```

Что делать если работает другая транзакция?

```
fun contention(tx: Transaction, owner: Transaction)
```

- **Abort**: Отменить другую транзакцию (`owner.abort()`)
- **Backoff**: Подождать немного
- **Priority**: Нумеровать транзакции: отменять более новые, более старые ждут.
- Отслеживать “сколько работы транзакция сделала”
- и т.п.

“Открываем” переменную при любой операции

```
class TVar<T> {
    fun openIn(tx: Transaction, update: (T) -> T): T {
        while (true) {
            val curLoc = loc.get()
            val curValue = curLoc.valueIn(tx) { … }
            if (curValue === TxStatus.ACTIVE) continue
        }
    }
}
```

“Открываем” переменную при любой операции

```
class TVar<T> {
    fun openIn(tx: Transaction, update: (T) -> T): T {
        while (true) {
            val curLoc = loc.get()
            val curValue = curLoc.valueIn(tx) { … }
            if (curValue === TxStatus.ACTIVE) continue
            val updValue = update(curValue as T)
        }
    }
}

fun readIn(tx: Transaction): T = openIn(tx) { it }
fun writeIn(tx: Transaction, x: T) = openIn(tx) { x }
```

“Открываем” переменную при любой операции

```
class TVar<T> {
    fun openIn(tx: Transaction, update: (T) -> T): T {
        while (true) {
            val curLoc = loc.get()
            val curValue = curLoc.valueIn(tx) { … }
            if (curValue === TxStatus.ACTIVE) continue
            val updValue = update(curValue as T)
            val updLoc = Loc(curValue, updValue, tx)
            if (loc.compareAndSet(curLoc, updLoc)) {
                …
            }
        }
    }
}
```

“Открываем” переменную при любой операции

```
class TVar<T> {
    fun openIn(tx: Transaction, update: (T) -> T): T {
        while (true) {
            val curLoc = loc.get()
            val curValue = curLoc.valueIn(tx) { … }
            if (curValue === TxStatus.ACTIVE) continue
            val updValue = update(curValue as T)
            val updLoc = Loc(curValue, updValue, tx)
            if (loc.compareAndSet(curLoc, updLoc)) {
                if (tx.status.get() == TxStatus.ABORTED)
                    throw AbortException()
                return updValue
            }
        }
```

Валидация
(против зомби-транзакций)

Анализ STM без блокировок

- Открываем “эксклюзивно” при любой операции
  - Но можно модернизировать реализацию для поддержки множества параллельных чтений

- Любая модификация исключает параллельное чтение
  - Но можно сделать так, чтобы читатели ждали, как было с блокировками

- И вообще, меняя реализацию алгоритма contention можно добиться поведения как с локами (всегда ждать если транзакционная переменная уже открыта/заблокирована)
  - Но самое интересное -- это приоритет более старой транзакции (гарантия ее завершения)

Длинные Read Only транзакции

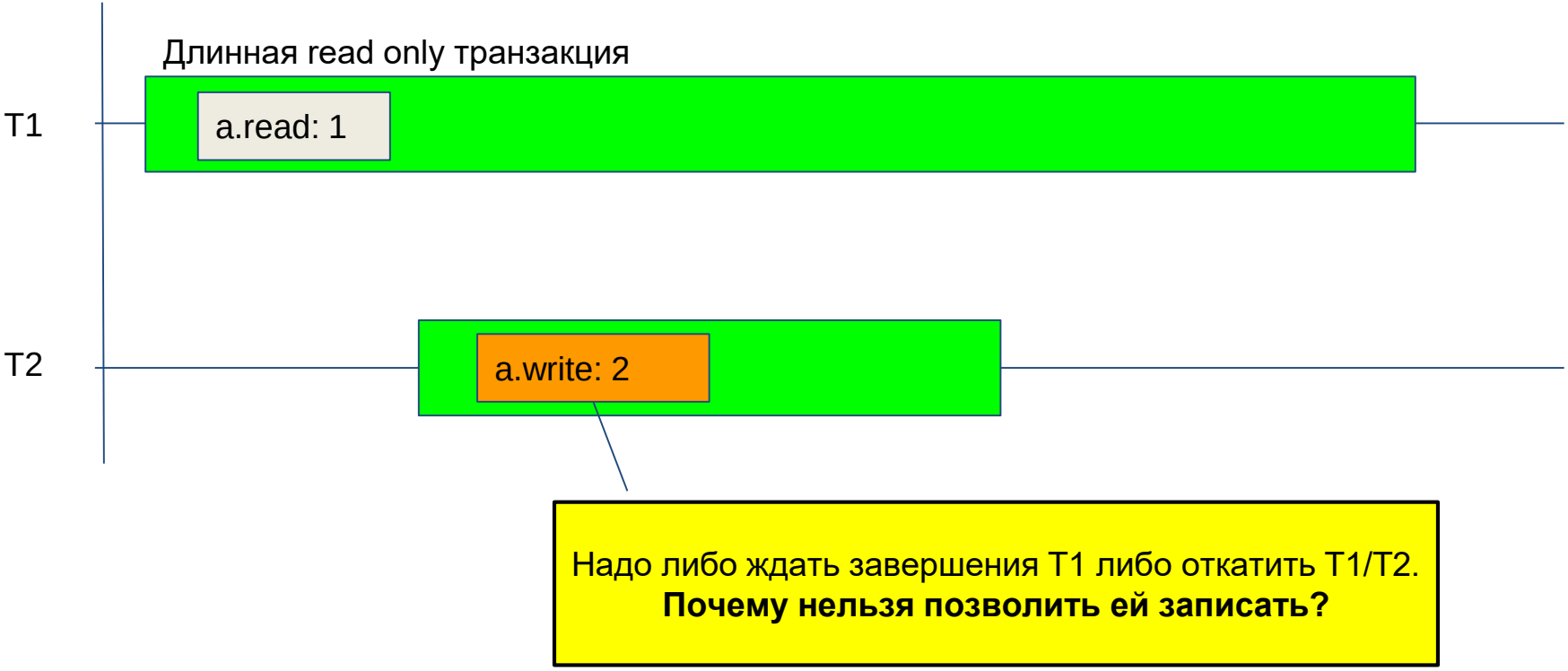
- Либо они не могут завершиться (ждут других)
- Либо мешают работать другим транзакция (мешают писать)

- Выход есть: **MVCC** (**Multi-Version Concurrency Control**)

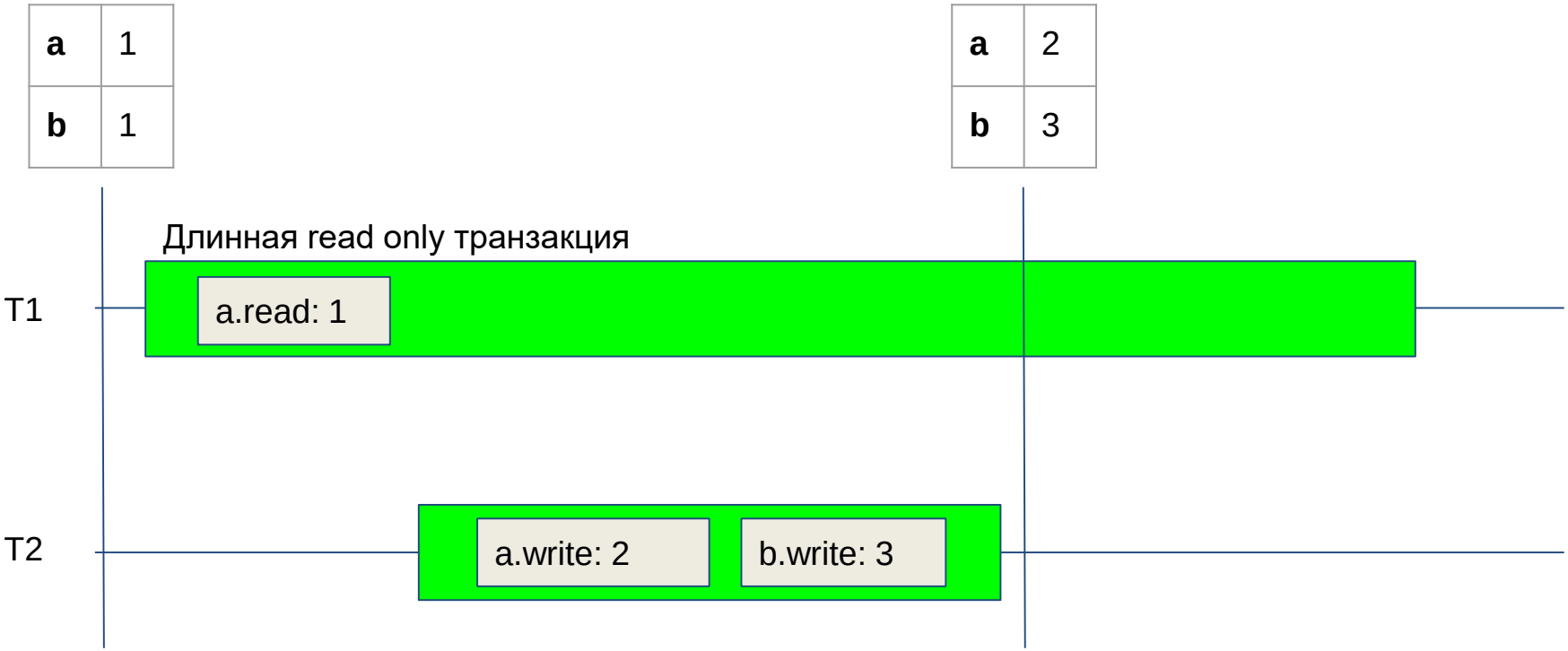
MVCC

Общая проблема

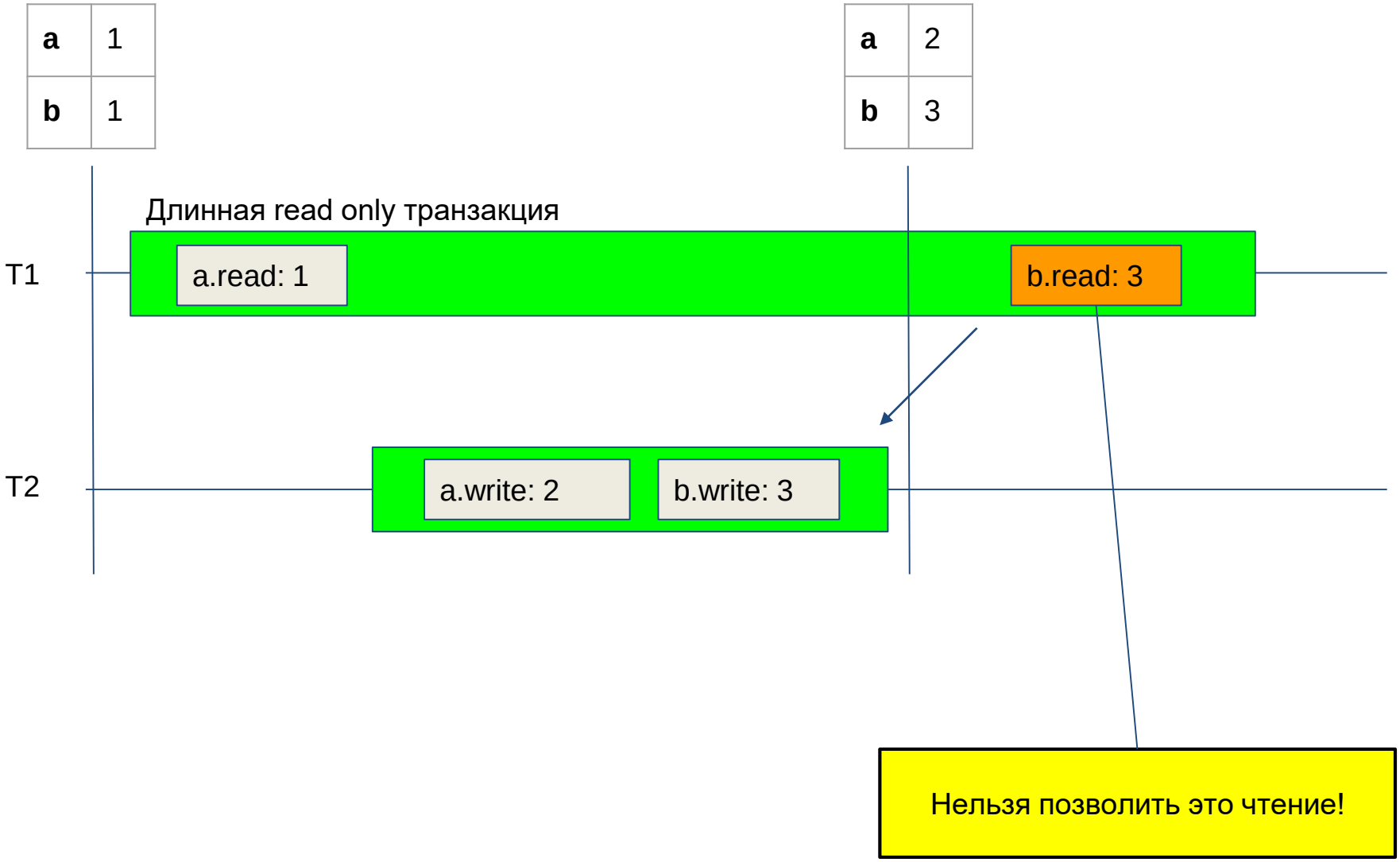
a	1
b	1



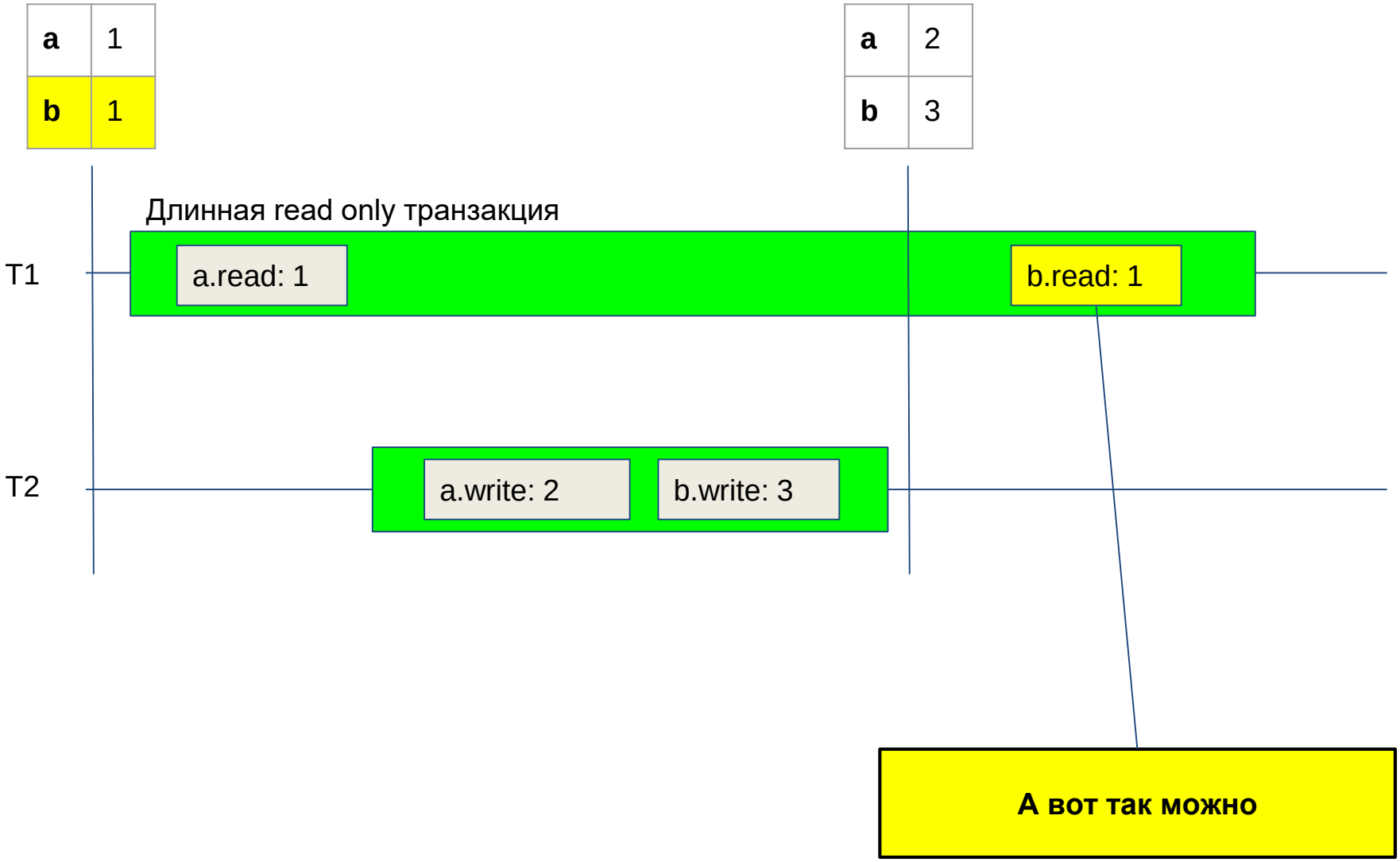
Общая проблема



Несогласованная картина мира



MVCC: Согласованная картина мира



MVCC: Основная идея

- Заведем глобальный номер транзакции ~= текущее время
- При начале транзакции запоминаем её время.
- Все чтения возвращают значения на начало транзакции

MVCC

	val	tst
a	1	0
b	1	0

MVCC

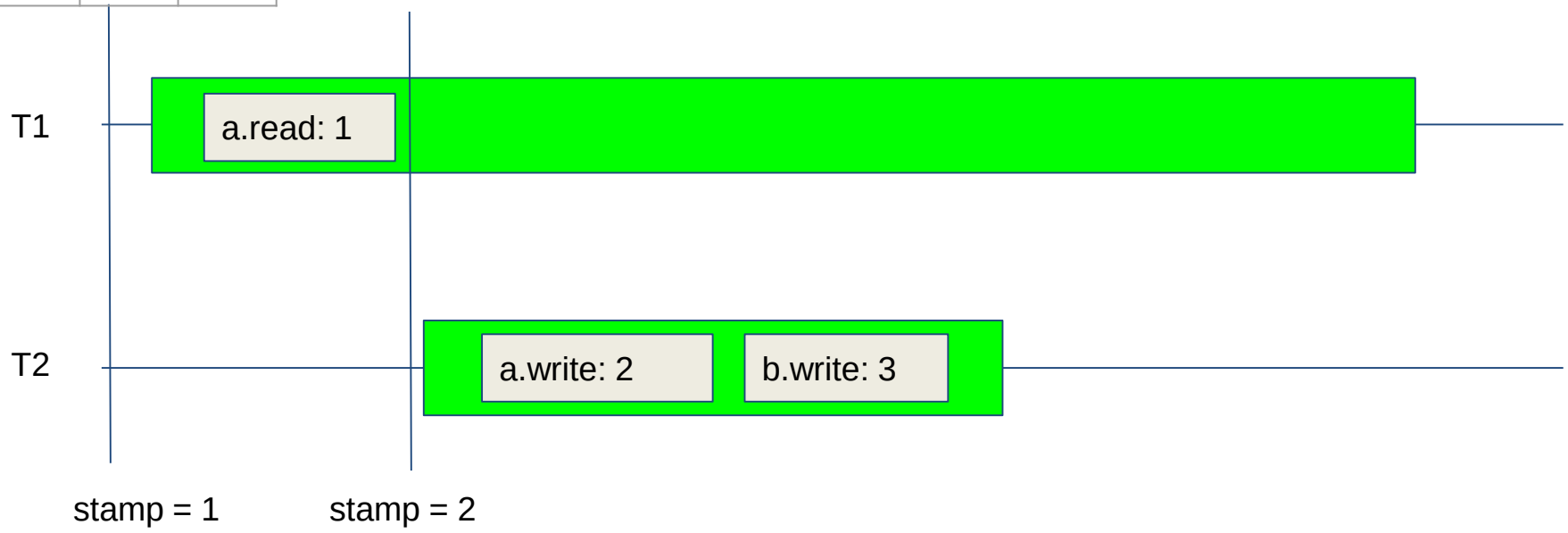
	val	tst
a	1	0
b	1	0

MVCC

	val	tst
a	1	0
b	1	0

MVCC

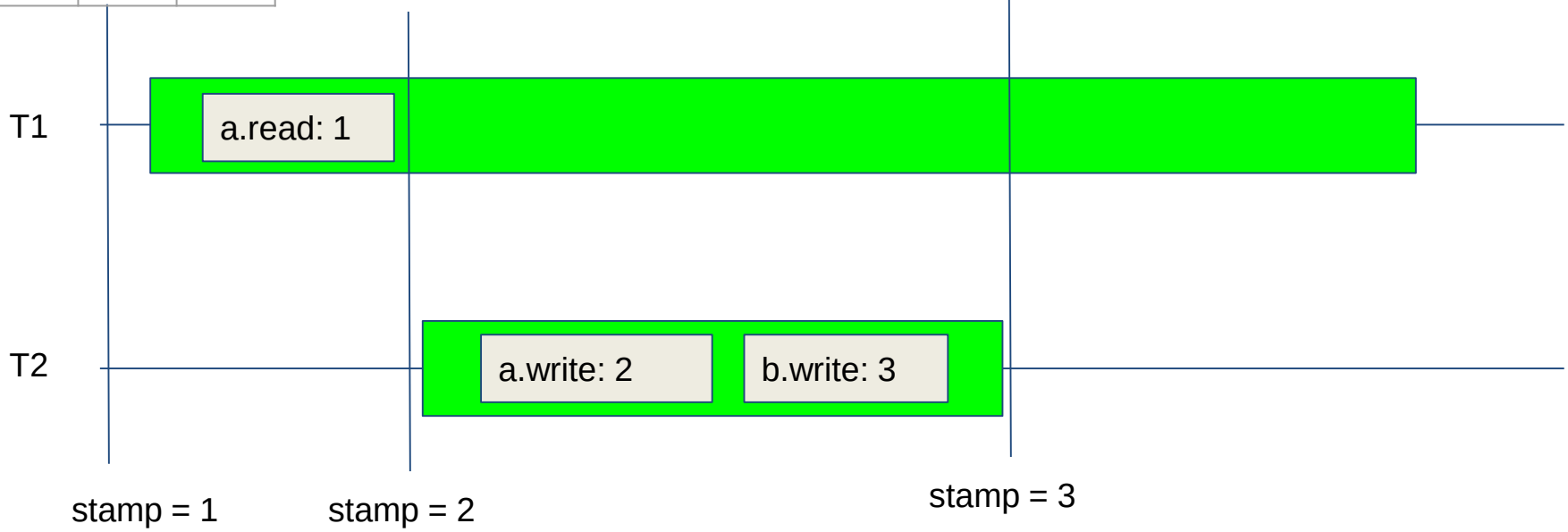
	val	tst
a	1	0
b	1	0



MVCC

	val	tst
a	1	0
b	1	0

	val	tst
a	2	3
b	3	3



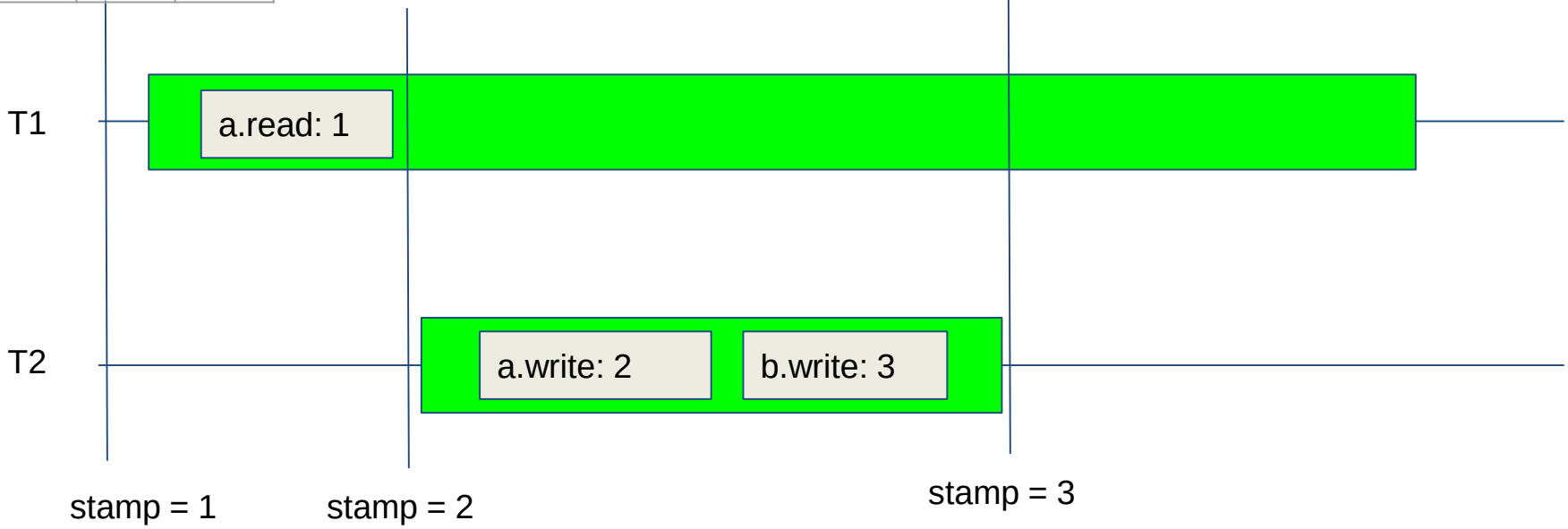
Отельное время завершения транзакции!
(Время линеаризации)

MVCC

	val	tst
a	1	0
b	1	0

Старые значения доступны

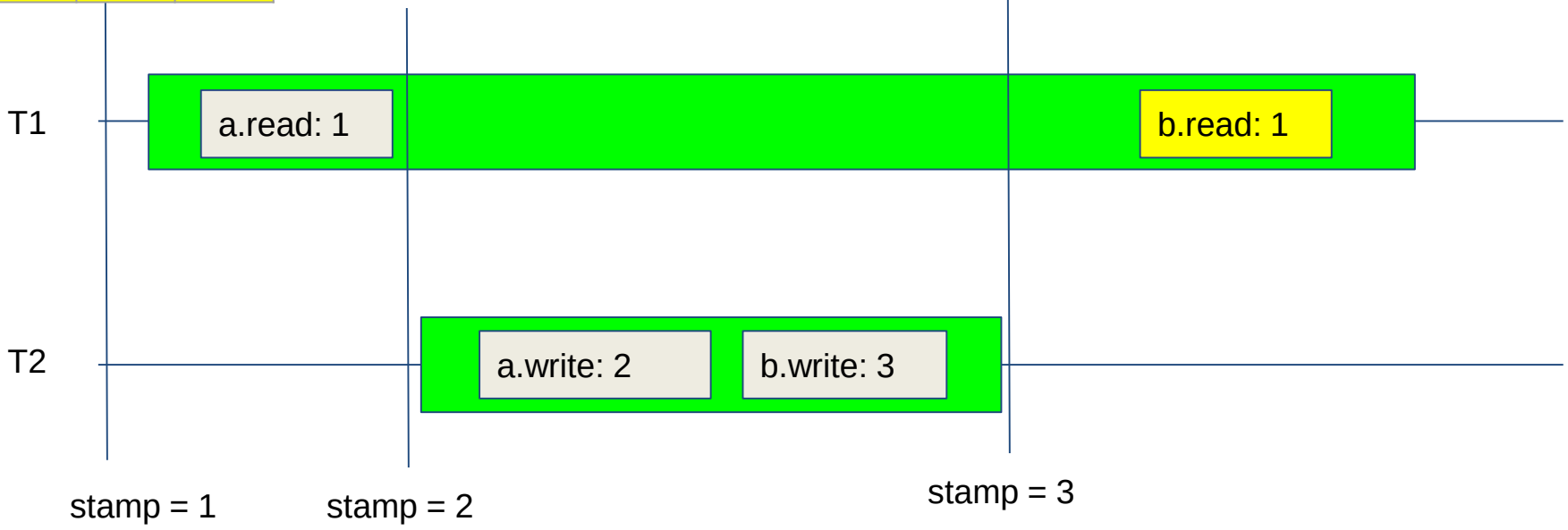
	val	tst
a	2	3
b	3	3



MVCC

	val	tst
a	1	0
b	1	0

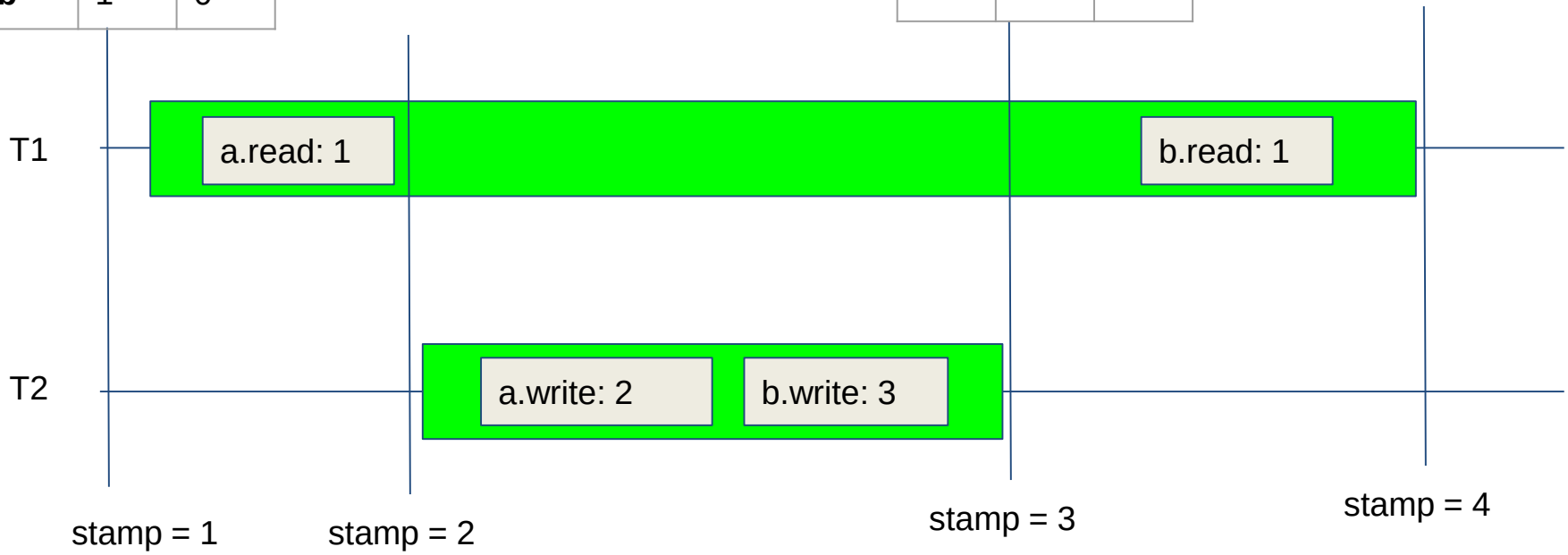
	val	tst
a	2	3
b	3	3



MVCC

	val	tst
a	1	0
b	1	0

	val	tst
a	2	3
b	3	3

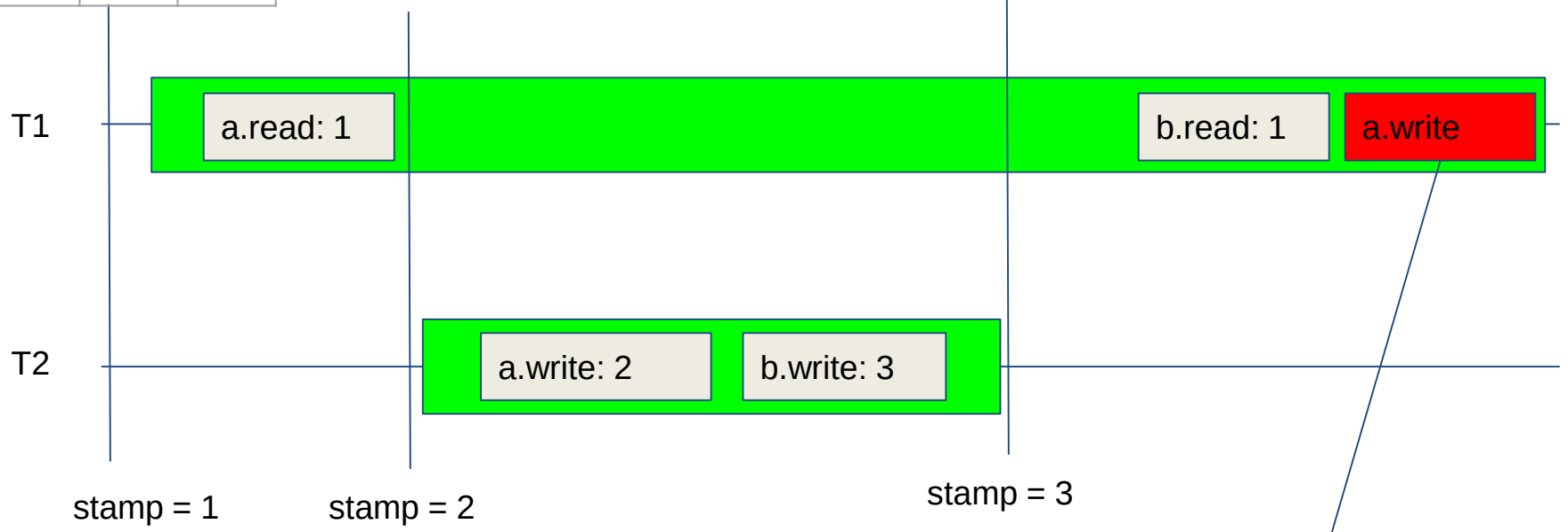


Можем завершить читающую транзакцию

MVCC

	val	tst
a	1	0
b	1	0

	val	tst
a	2	3
b	3	3



Но если позволить этой транзакции работать, то это безопасный “зомби” -- можно проверять согласованность записей только во время завершения транзакции.

Обзор STM

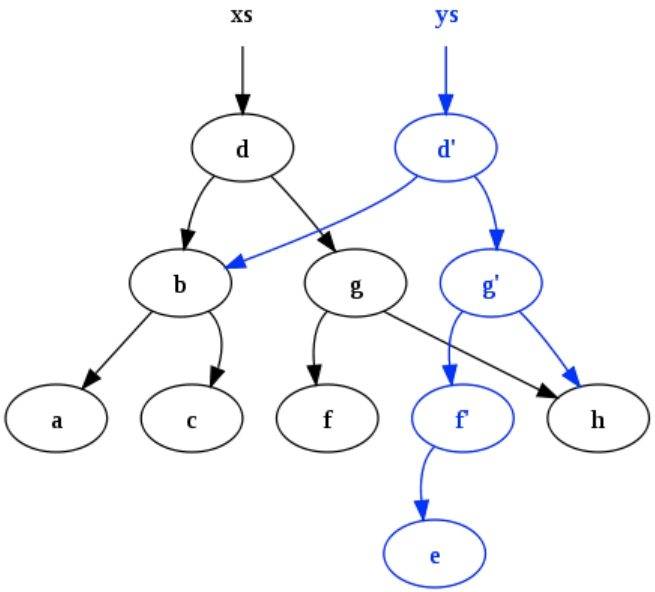
Общий анализ STM

- STM это очень медленно
  - Каждый read/write это всегда какой-то indirection

- STM без MVCC могут быть реализованы так, что накладные расходы есть только на значения “участвующие в транзакции”
  - Каждое значение это либо “реальное значение” либо указатель на некий дескриптор хранящий транзакцию владелец, локи, старые значения и т.п.
  - Но без MVCC и без блокировок длинные readonly транзакции

- STM+MVCC всегда вынужден хранить как минимум пару (значение,версия) + еще значения для старых версий (для которых еще есть активные транзакции)

Персистентные структуры данных



- Персистентные структуры = immutable + древовидные
  - Обновление обычно за O(log N)
  - Существуют “эффективные” реализации большинства классических структур
  - Иногда удается добиться O(1) но большая константа

STM + Персистентные структуры данных = ❤

- А что если всё состояние приложения хранить в одной или нескольких персистентных структурах данных?
  - Тогда можно спокойно использовать STM
  - Можно использовать STM+MVCC
  - Но, платим логарифмом + выделения памяти при всех обновлениях

Hardware Transactional Memory

Hardware Transactional Memory (HTM)

- Intel Transactional Synchronization Extensions (TSX)
  - XBEGIN - начинает транзакцию
  - XEND - завершает транзакцию
  - XABORT - откатывает транзакцию

Но как?

- Протоколы когерентности кэша (MESI)

- Значение, которое write в транзакции храним Exclusive/Modified
  - Если другой процессор хочет его читать - abort
- Значение, которые read в транзакции храним Shared/E/M
  - Если другой процессор его хочет менять - abort
- Сбрасываем в основную память только при успешном окончании транзакции
  - Если кто-то хочет значение после xend, но до того, как успели сбросить -- не проблема (умеет передавать по шине)

- По сути всё очень просто - нужен еще один бит о том, что значение это часть транзакции

Анализ HTM

- Очень быстро работает (вообще нет накладных расходов)

- Будет надежно работать только для очень быстрых транзакций (сложно успешно завершить длинную из-за aborts)
- Ограничено физическим размером кэша
  - Что хуже - ограничено ассоциативностью

HTM для избежания блокировок (Lock Elision)

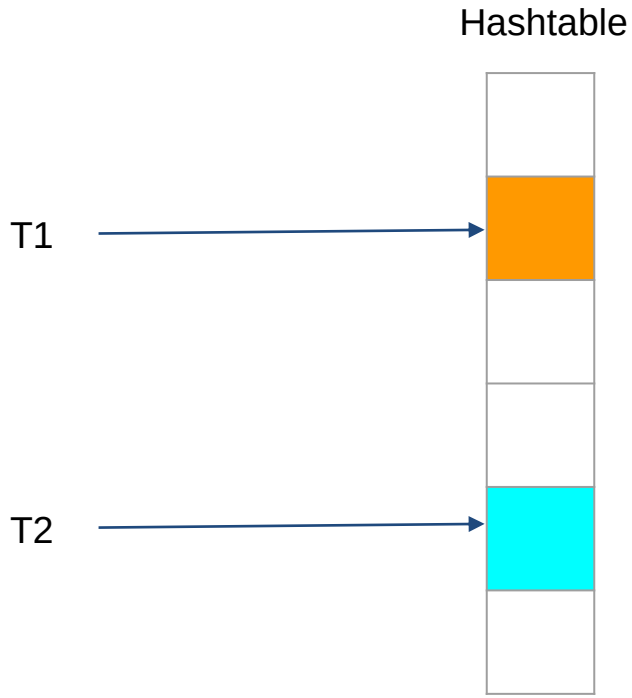
```
class Lock {
    val state = atomic(0)

    fun lock() {
        while (true) {
            if (state.compareAndSet(0, 1)) break
            // wait & retry
        }
    }

    fun unlock() {
        state.value = 0
    }
}
```

HTM для избежания блокировок (Lock Elision)

```
fun lock() {
    if (xbegin()) {
        if (state.value == 0) return
        xabort() // иначе берем лок обычно
    }
    while (true) {
        if (state.compareAndSet(0, 1)) break
        // wait & retry
    }
}

fun unlock() {
    if (state.value == 0) {
        xend()
        return
    }
    state.value = 0
}
```

HTM для избежания блокировок (Lock Elision)

- Можно писать код с грубой блокировкой
- А получать параллелизм как с тонкой блокировкой



HTM LE: Практические проблемы

- В реальных структурах данных есть какой-нибудь size из-за изменений которого параллелизма транзакций не будет

- Как только одна транзакция пошла по software пути (по любой причине), всё сваливается на STM

HTM для специфичных структур данных

- DCSS/CASN можно эффективно реализовать через HTM
- Всегда можно сделать fallback на программную реализацию
  - Алгоритм Хариса “HTM ready”

Hybrid Transaction Manager

- Пытаемся делать atomic { … } через HTM
- Если не получилось -- fallback на STM