

- Немного об алгоритмах консенсуса.  
Казалось бы, при чем тут Node.js?

**Андрей Печкуров**

# О докладчике

- Пишу на Java (очень долго), Node.js (долго)
- Node.js core collaborator
- Интересы: веб, архитектура, распределенные системы, производительность
- Можно найти тут:
  - <https://twitter.com/AndreyPechkurov>
  - <https://github.com/puzpuzpuz>
  - <https://medium.com/@apechkurov>



- Hazelcast In-Memory Data Grid (IMDG)
- Большой набор распределенных структур данных
- Показательный пример - `Map` , который часто используют как кэш
- Написана на Java, умеет embedded и standalone режимы
- Хорошо масштабируется вертикально и горизонтально
- Часто используется в high-load и low-latency приложениях
- Области применения: IoT, in-memory stream processing, payment processing, fraud detection и т.д.



- Hazelcast In-Memory Data Grid (IMDG)
- Хотите production-ready Raft? У нас есть CP Subsystem (с Jepsen тестами и lock'ами 😊)
- <https://docs.hazelcast.org/docs/4.0.1/manual/html-single/index.html#cp-subsystem>



## Hazelcast IMDG Node.js client

- <https://github.com/hazelcast/hazelcast-nodejs-client>
- Поддерживает CP Subsystem
- P.S. А вот доклад про историю оптимизаций: <https://youtu.be/CSnmpbZsVD4>

## Делай раз

```
const lock = await client.getCPSubsystem().getLock('my-lock');

const fence = await lock.lock();
try {
    // "защищенный" код
    // (доступен только владельцу)
} finally {
    await lock.unlock(fence);
}
```

## Делай два

```
const ref = await client.getCPSubsystem().getAtomicReference('my-ref');

await ref.set({ foo: 'bar' });

// атомарно заменяем значение
// (только если оно совпадает с ожидаемым)
const result = await ref.compareAndSet(
  { foo: 'bar' },
  { bar: 'baz' }
);
```

## Делай три

```
const counter = await client.getCPSubsystem().getAtomicLong('my-counter');  
  
// атомарно увеличиваем счетчик  
const knownValue = await counter.incrementAndGet();  
  
// атомарно заменяем значение  
// (только если оно совпадает с ожидаемым)  
const result = await counter.compareAndSet(knownValue, 42);
```

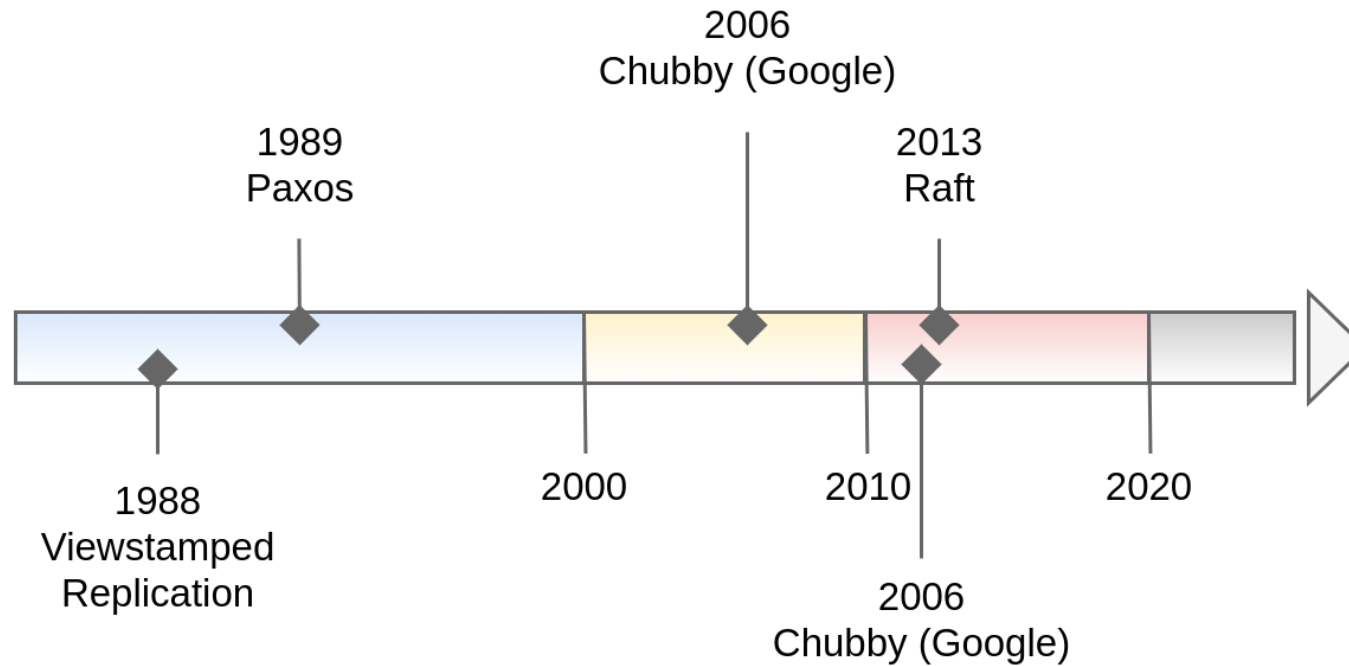


# План на сегодня

- Начинаем пугаться распределенных систем
- Знакомимся с моделями согласованности (consistency)
- CAP теорема и прочие классификации
- Что за зверь - алгоритм консенсуса?
- История: Paxos и его подвиды, Raft
- CASPaxos, как один из недавних Paxos-образных
- Pet project: CASPaxos на Node.js

➤ **Начинаем пугаться  
распределенных систем**

# Упрощенная до ужаса история



Эра централизованных БД



Становление распределенных систем



Бум распределенных систем



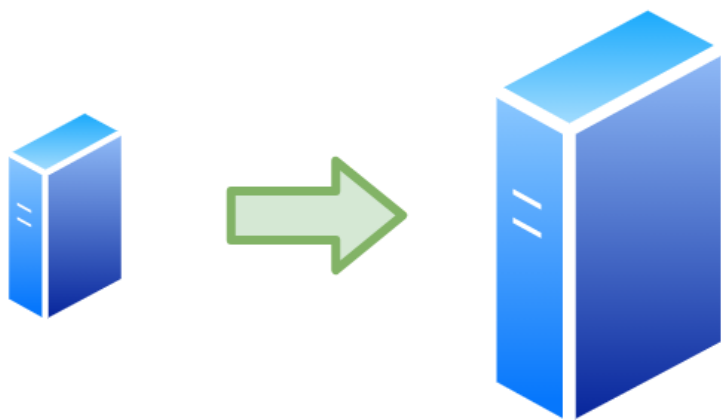
Будущее?

# Распределенная система

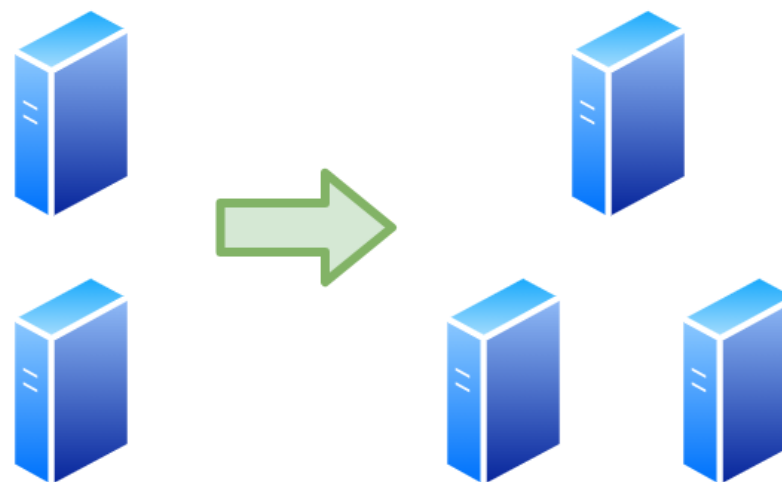
- Назовем распределенной систему, хранящую состояние (общее) на нескольких машинах, соединенных сетью
- Для определенности будем подразумевать хранилище пар ключ-значение

# Отличия: масштабирование

Централизованная  
система



Распределенная  
система



# Отличия: работа с данными

Централизованная  
система

```
const data = await readData();
```



Распределенная  
система

```
const data = await readData();
```



# Отличия: вероятность отказа

Централизованная  
система

$P(S)$



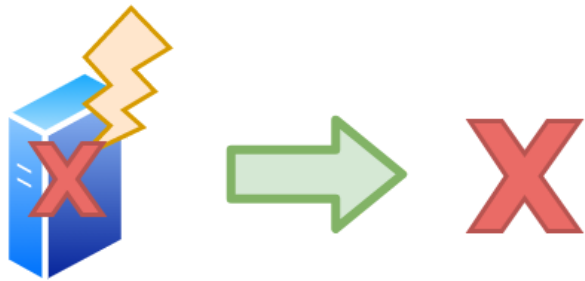
Распределенная  
система

$P(S1 + S2) = P(S1) + P(S2) - P(S1 \times S2)$

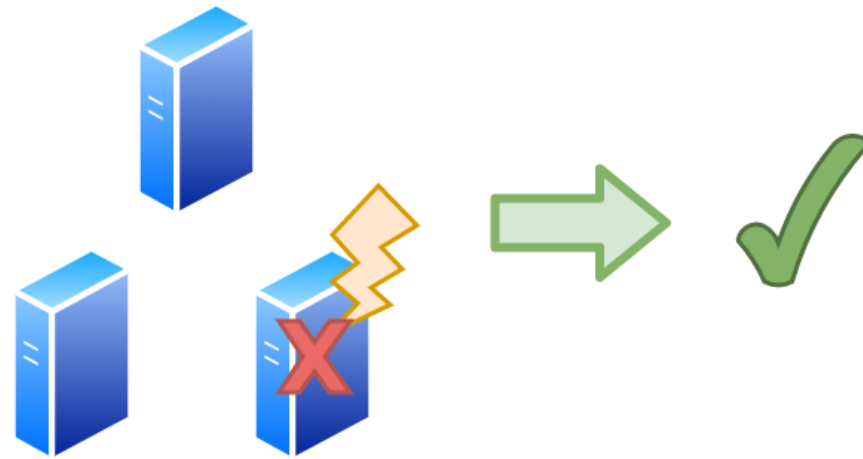


# Отличия: критичность отказа

Централизованная  
система



Распределенная  
система





# Fallacies of distributed computing

- Инженеры из Sun (R.I.P.) еще в 94м сформулировали такой список:
  - **The network is reliable**
  - **Latency is zero**
  - **Bandwidth is infinite**
  - The network is secure
  - Topology doesn't change
  - There is one administrator
  - Transport cost is zero
  - The network is homogeneous
- P.S. Добавим сюда "**Clocks are in sync**"

## Сеть

- Мы работаем с асинхронными сетями
- Отправленный запрос может:
  - Быть потерян при отправке туда/обратно
  - Находиться в очереди ожидания отправки (если сеть под нагрузкой)
  - Быть получен, но машина-адресат дала сбой до или во время обработки
- Единственный способ подтверждения - получить ответ

## Локальные

- Каждая машина работает с локальным временем ( `Date.now()` )
- Локальные монотонные часы ( `process.hrtime` ) помогают, но далеко не всегда
- В действительности нам хотелось бы иметь глобальные часы

## Глобальные

- Увы, глобальные (синхронизированные) часы невозможны без специального железа
- Байка: в Google Spanner часы в ЦОД синхронизированы в пределах 7 мс (атомные часы + GPS)
- Оффтопик: векторные "часы" частично решают проблему

**Чего мы ждем от распределенной системы? 🤔**

## Мой личный список

1. Отказоустойчивость
2. Масштабируемость
3. Удобство поддержки (мониторинг, администрирование)

## Чего мы еще ждем?

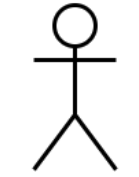
- Допустим, что мы ждем того же поведения, что и у централизованного хранилища
- А именно - с клиентской стороны поведение должно быть, как если бы это была централизованная система (пока остановимся на этой формулировке)

## Фигня вопрос - сейчас придумаем алгоритм

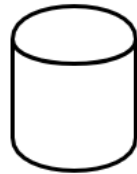
1. Любой узел принимает клиентские запросы (прочитать/записать)
2. Затем - отправляет операцию на все остальные узлы
3. Ждет ответов от большинства (консенсус жеж 😊)
4. Дождавшись консенсуса, отправляет клиенту сообщение об успехе



# Что не так с нашим изобретением?



Client



Node 1

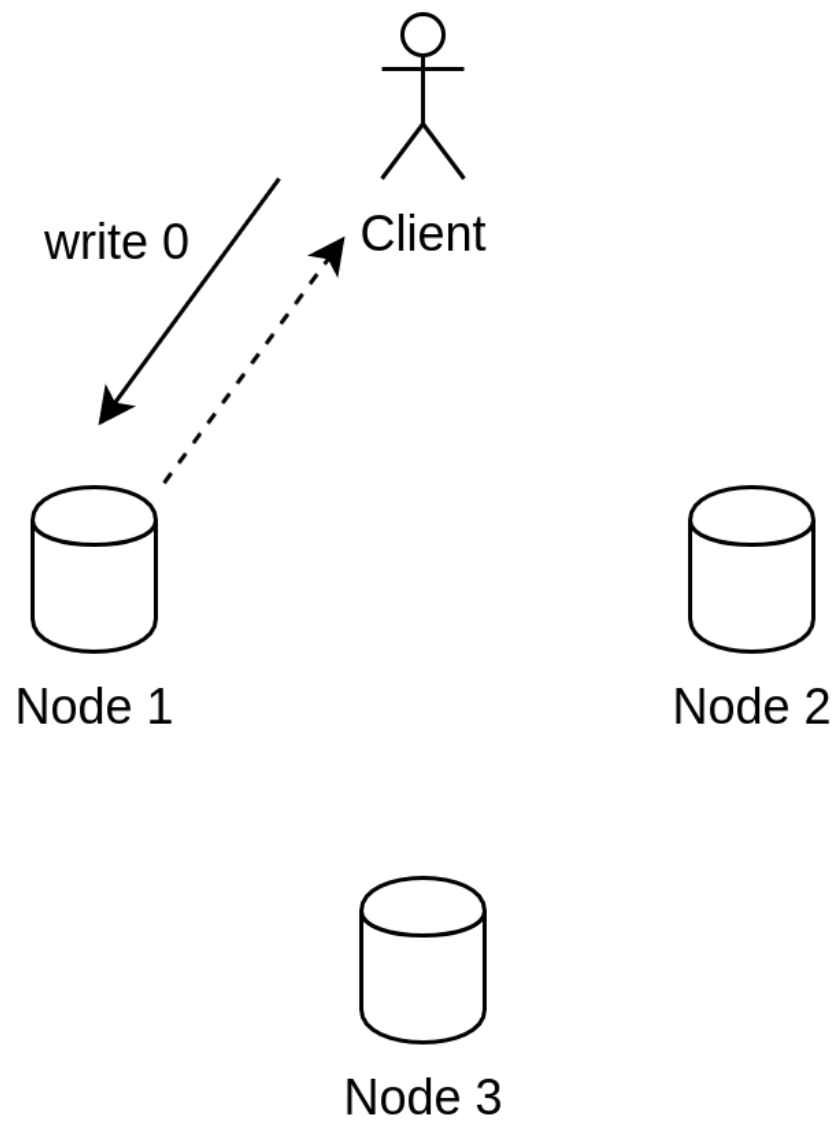


Node 2

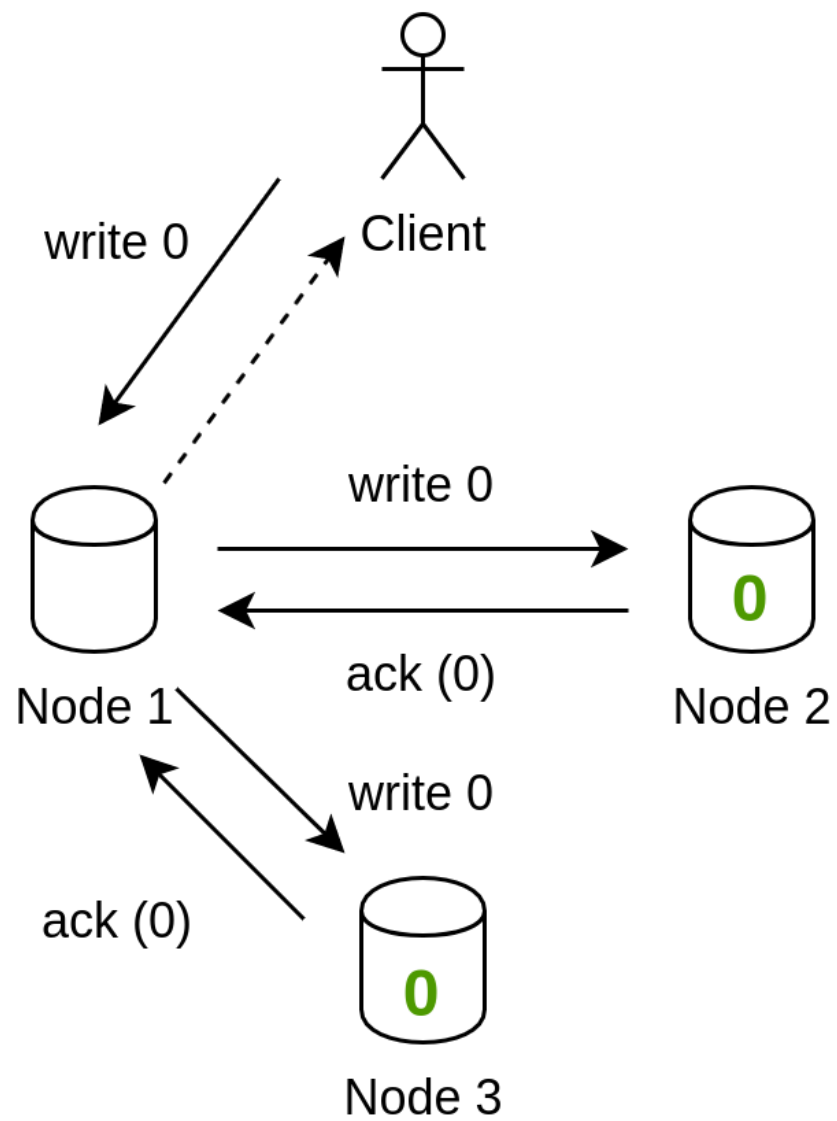


Node 3

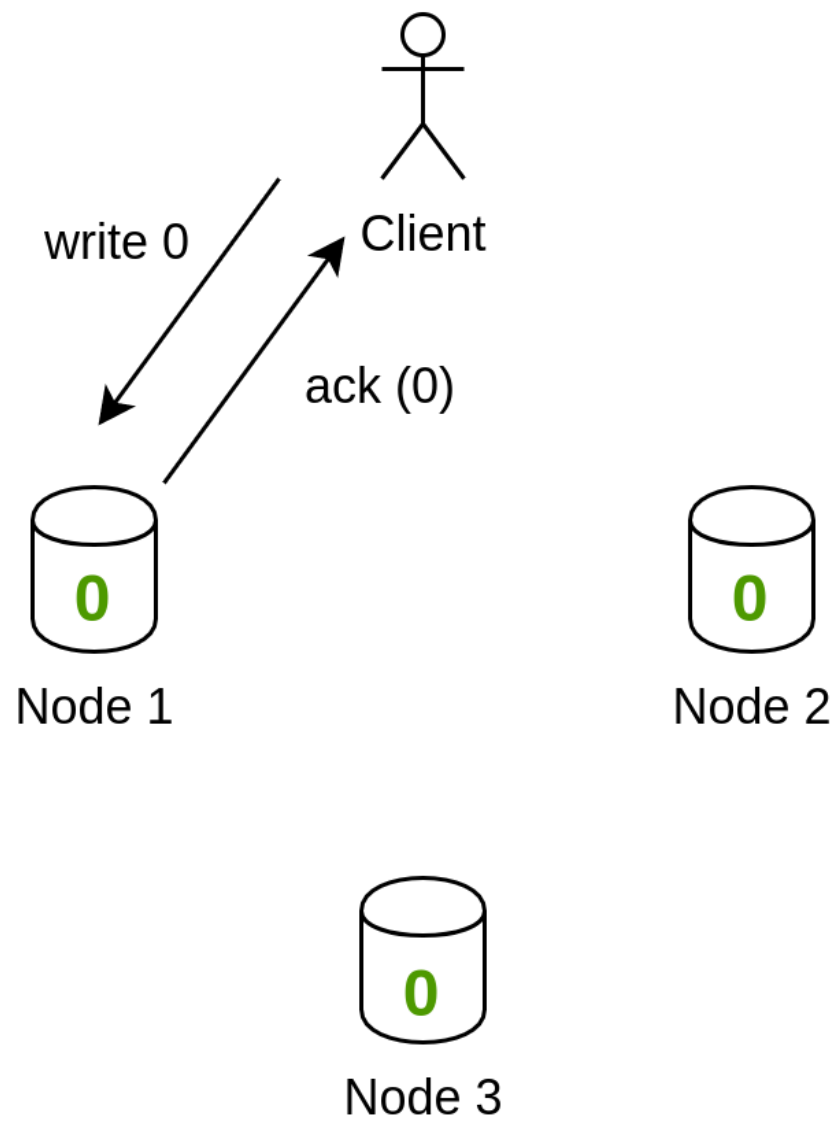
# Что не так с нашим изобретением?



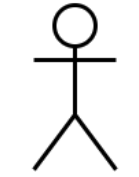
# Что не так с нашим изобретением?



# Что не так с нашим изобретением?



# Что не так с нашим изобретением?



Client



Node 1

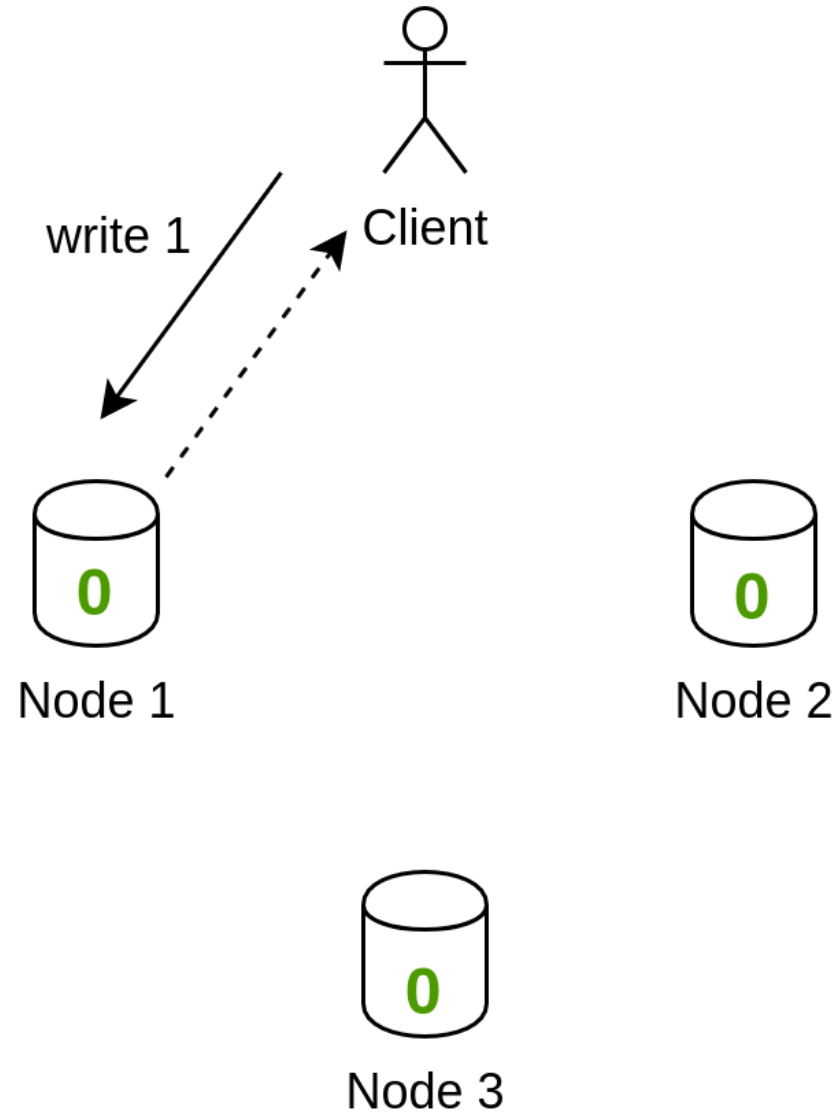


Node 2

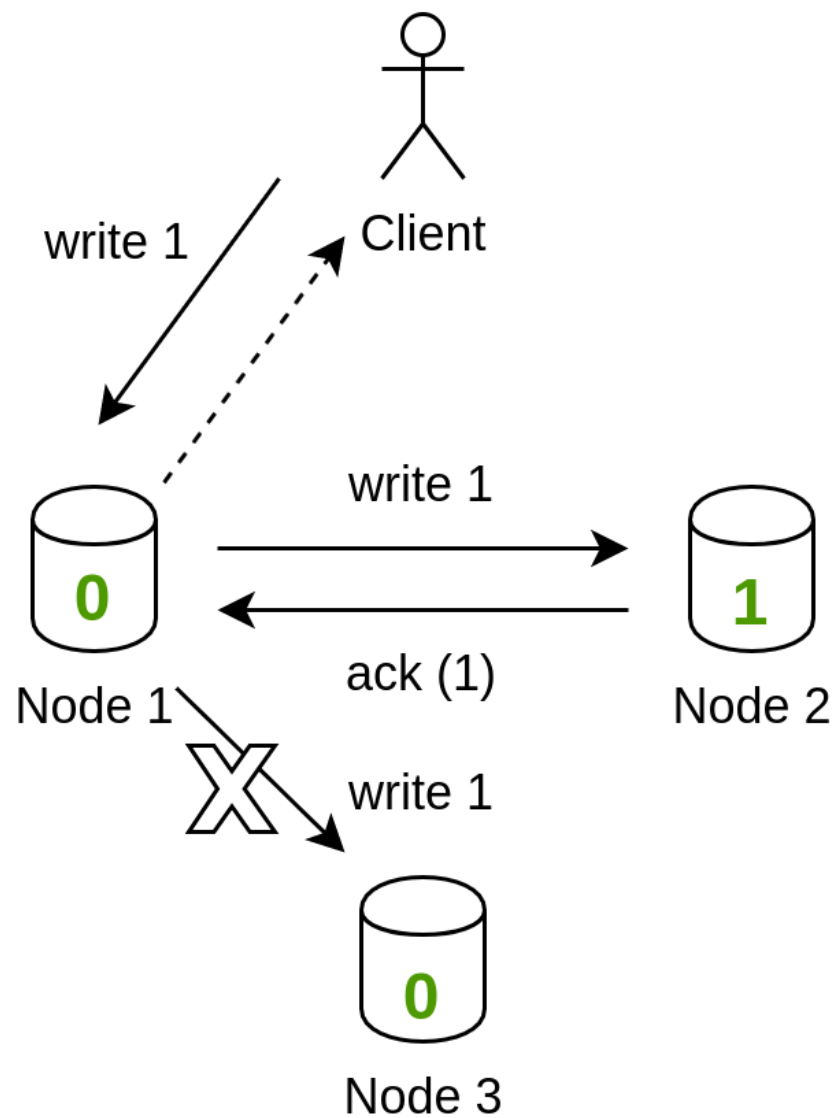


Node 3

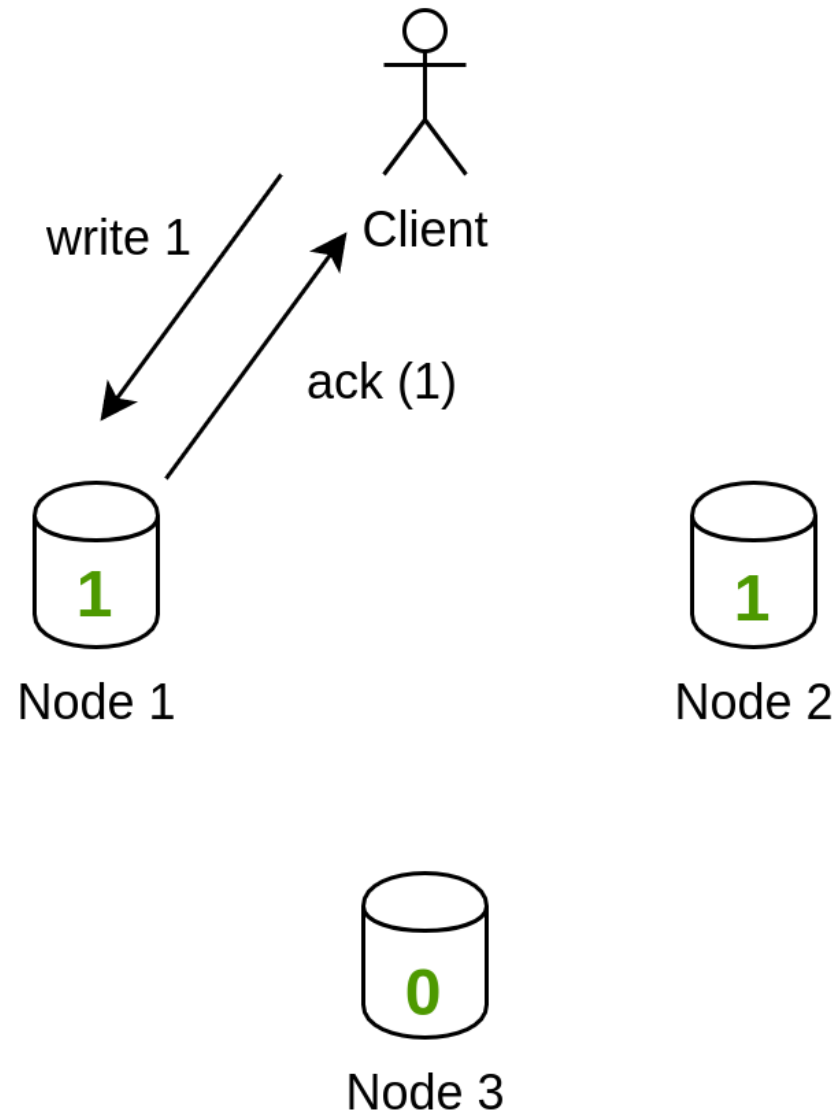
# Что не так с нашим изобретением?



# Что не так с нашим изобретением?

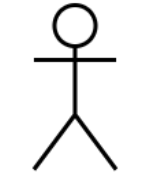


# Что не так с нашим изобретением?





# Что не так с нашим изобретением?



Client



Node 1

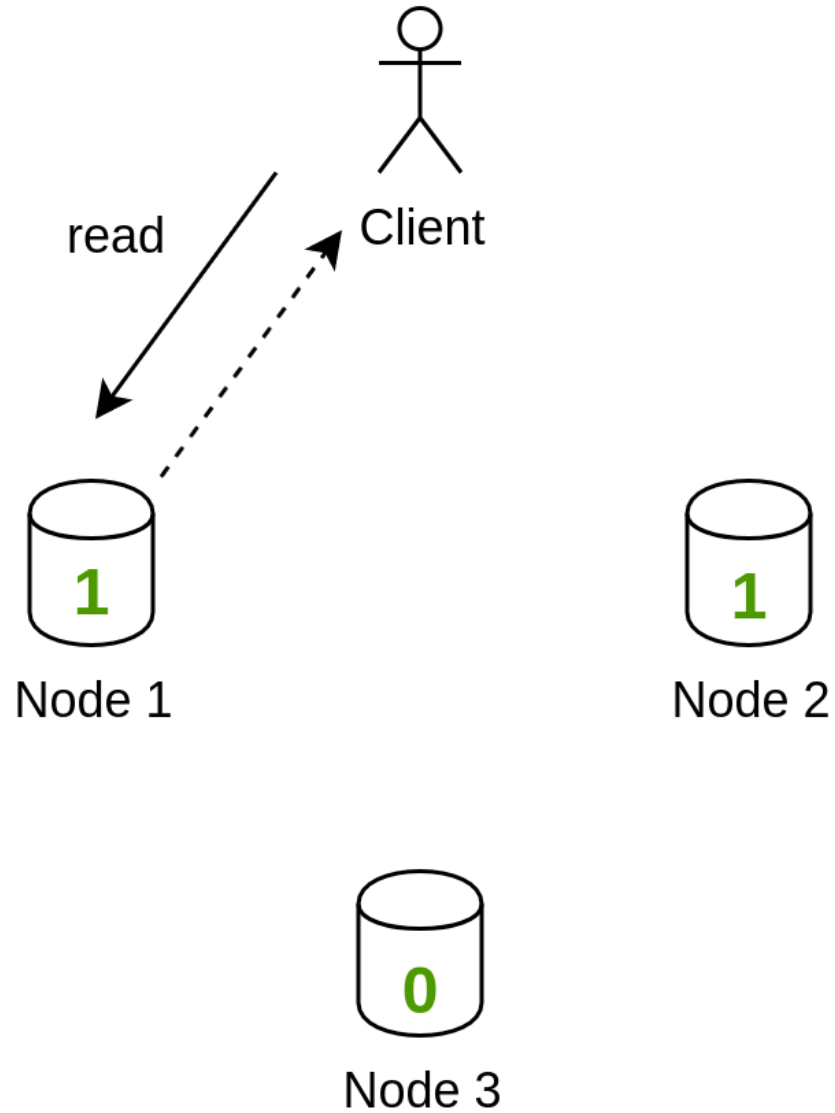


Node 2

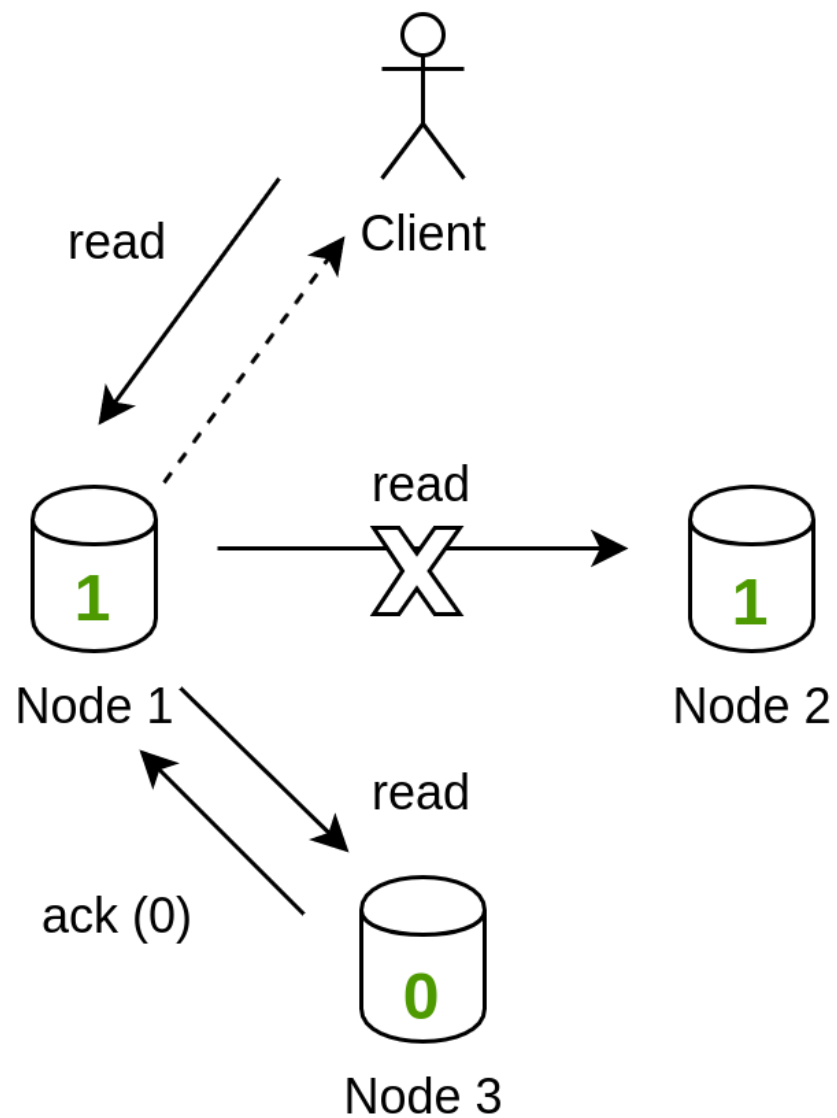


Node 3

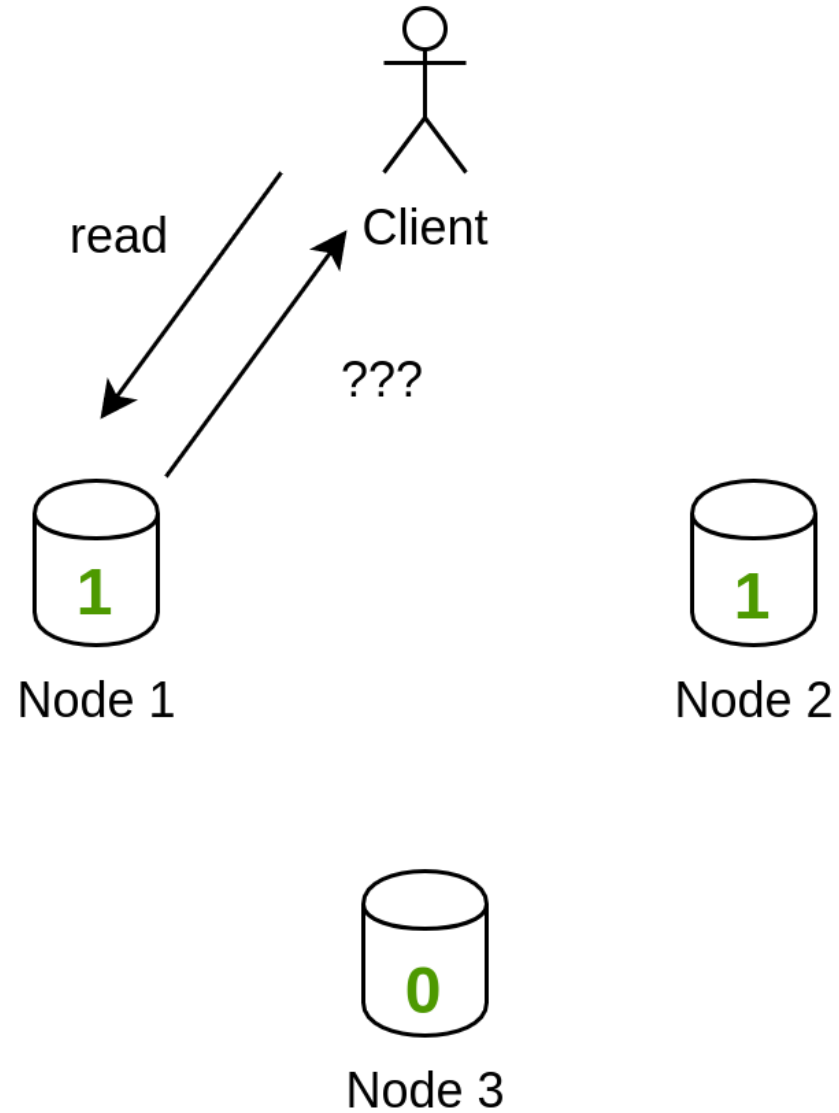
# Что не так с нашим изобретением?



# Что не так с нашим изобретением?



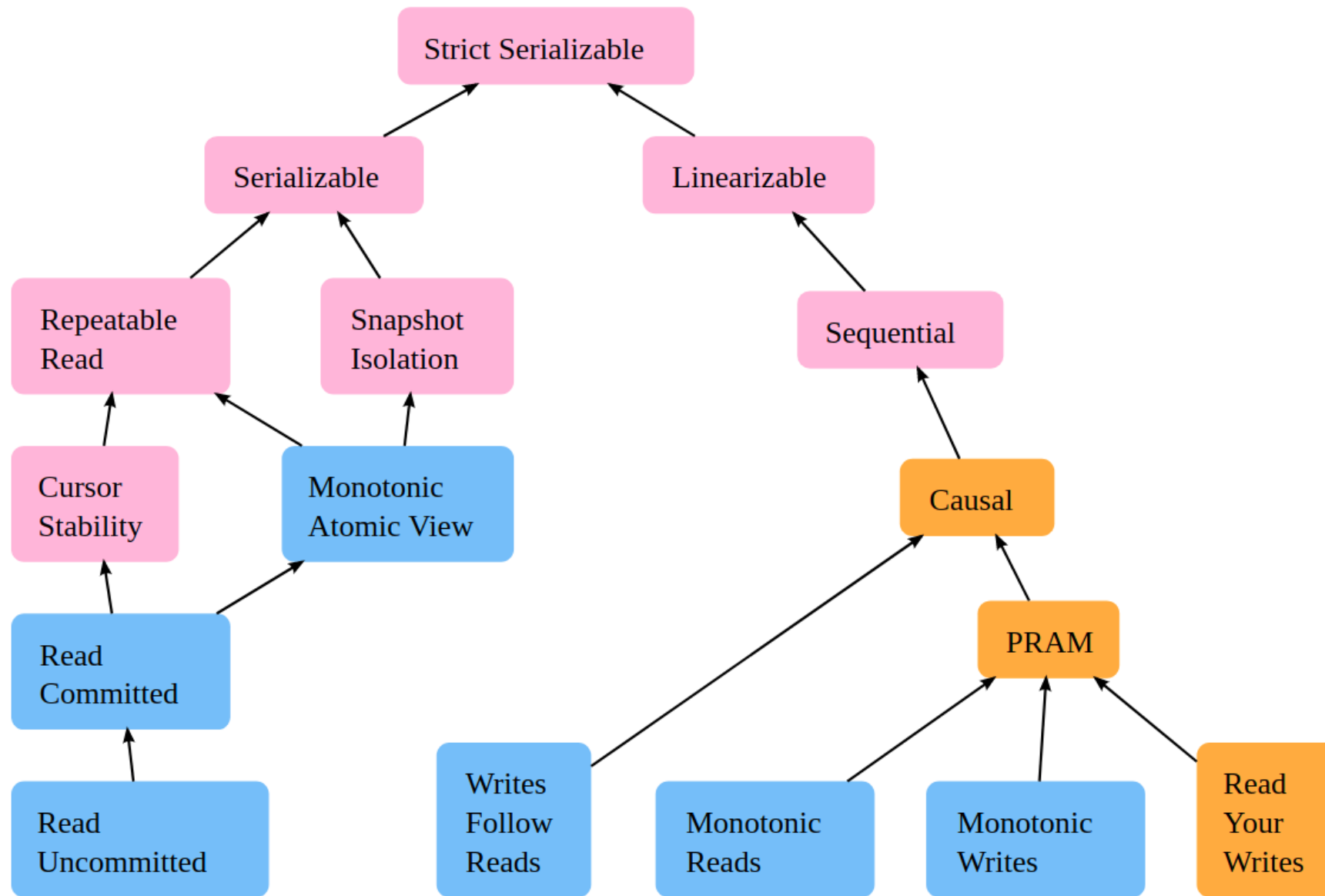
# Что не так с нашим изобретением?



- 
- Знакомимся с моделями согласованности (consistency)

## Неформальное определение

Модель согласованности (consistency model) - это гарантии, которые система (внезапно, не только распределенная) предоставляет относительно набора поддерживаемых операций



# Linearizable consistency model

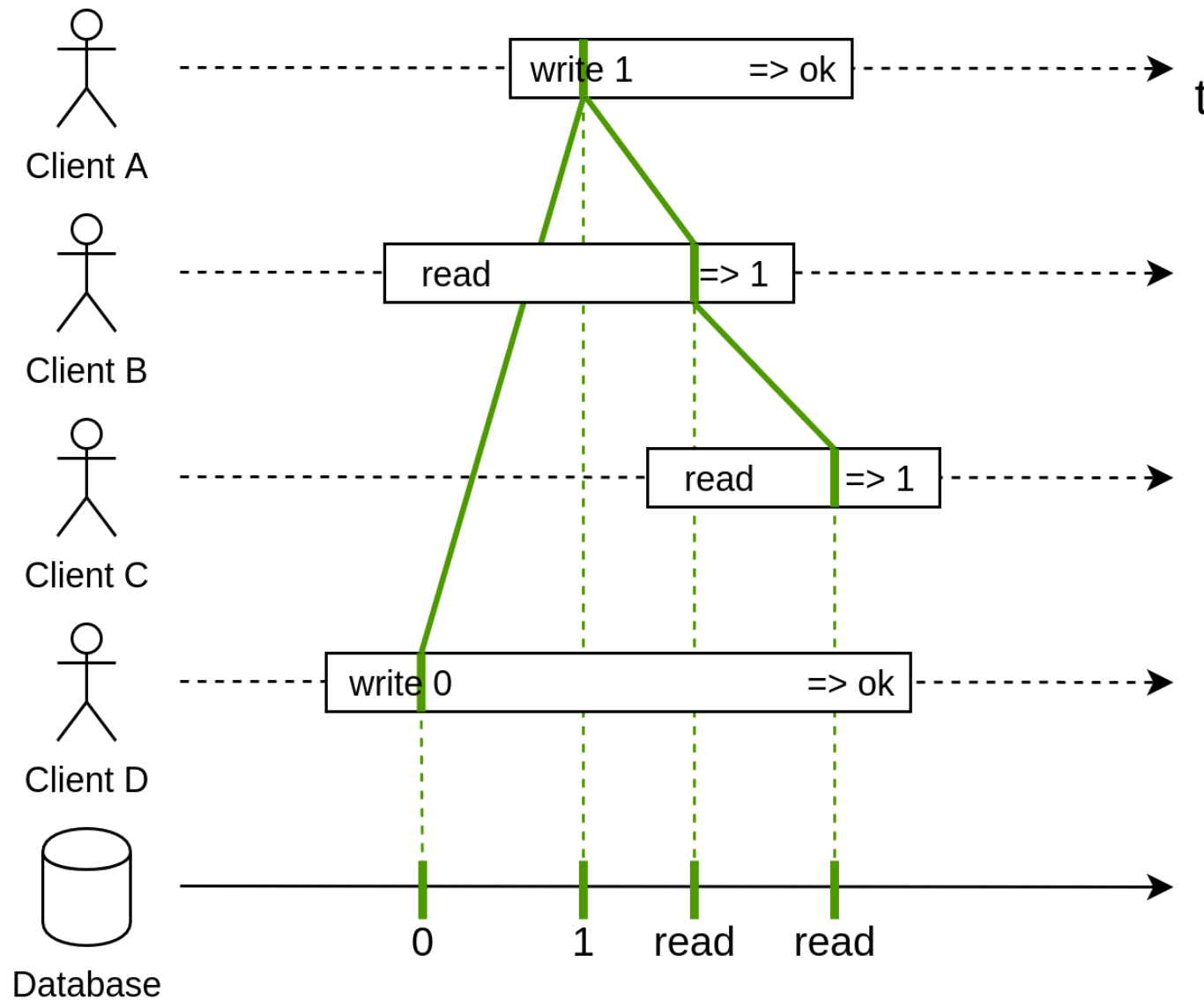
- Одна из наиболее строгих (сильных) моделей согласованности для **одного** объекта
- Именно ее мы и подразумевали (надеюсь) ранее:  
"с клиентской стороны поведение должно быть, как если бы это была централизованная система"



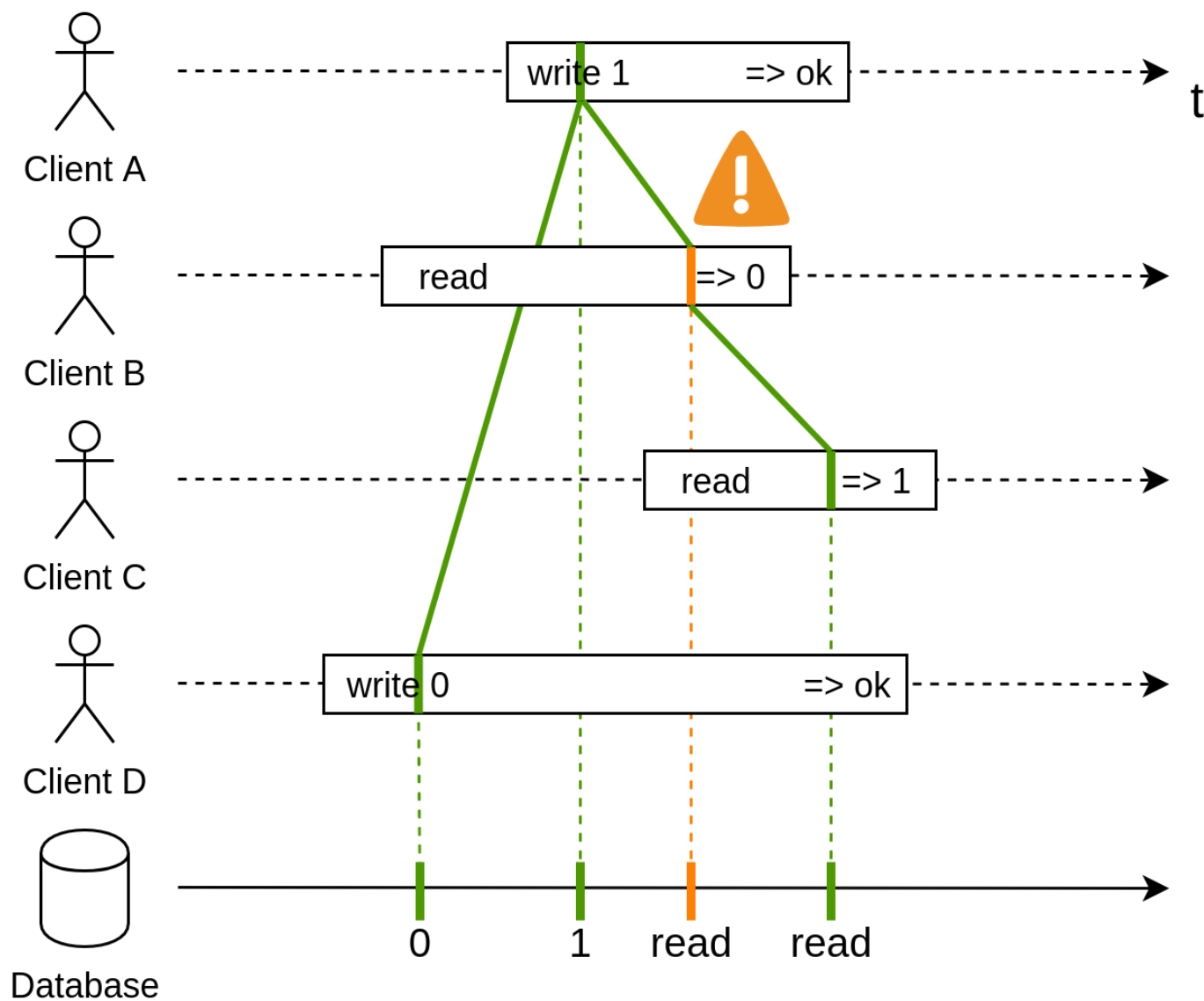
# Неформальное определение linearizability

- Система гарантирует, что каждая операция выполняется атомарно, в **некотором** (общем для всех клиентов) порядке, не противоречащим порядку выполнения операций в реальном времени
- Т.е. если операция А завершается до начала операции В, то В должна учитывать результат выполнения операции А

# Допустимый порядок



# Недопустимый порядок





## ➤ САР теорема и прочие классификации

# CAP теорема

- Сформулирована Eric Brewer в 1998, как утверждение
- В 2002 появилось формальное доказательство
- Рассматривается система с одним регистром
- CAP:
  - Consistency: подразумевается линейаризуемость
  - Availability: каждый запрос, полученный узлом системы, должен приводить к ожидаемому ответу (не к ошибке)
  - Partition tolerance: подразумевается коммуникация через асинхронную сеть

# Partition tolerance

Network partition - сценарий, когда узлы продолжают функционировать, но некоторые из них не могут общаться между собой

# Неформальное определение

В условиях network partition рассматриваемая система может быть:

- Доступна (AP)
- Согласована (CP)

P.S. CA опции в CAP теореме нет и в помине

# Критика

- Однобокая классификация, которая почему-то прижилась
- Например, РСУБД с одной read-only репликой не является ни СР, ни АР
- Теорема ничего не говорит о времени отклика системы, т.е. АР система может отвечать сколь угодно медленно
- Наконец, network partition - далеко не единственный сценарий отказа



# Альтернативы

- PACELC теорема - расширение CAP теоремы (Daniel J. Abadi, 2010)
- PAC = PA | PC (та же CAP теорема)
- ELC = EL | EC:
  - E: else
  - L: latency
  - C: consistency

➤ **Что за зверь - алгоритм консенсуса?**

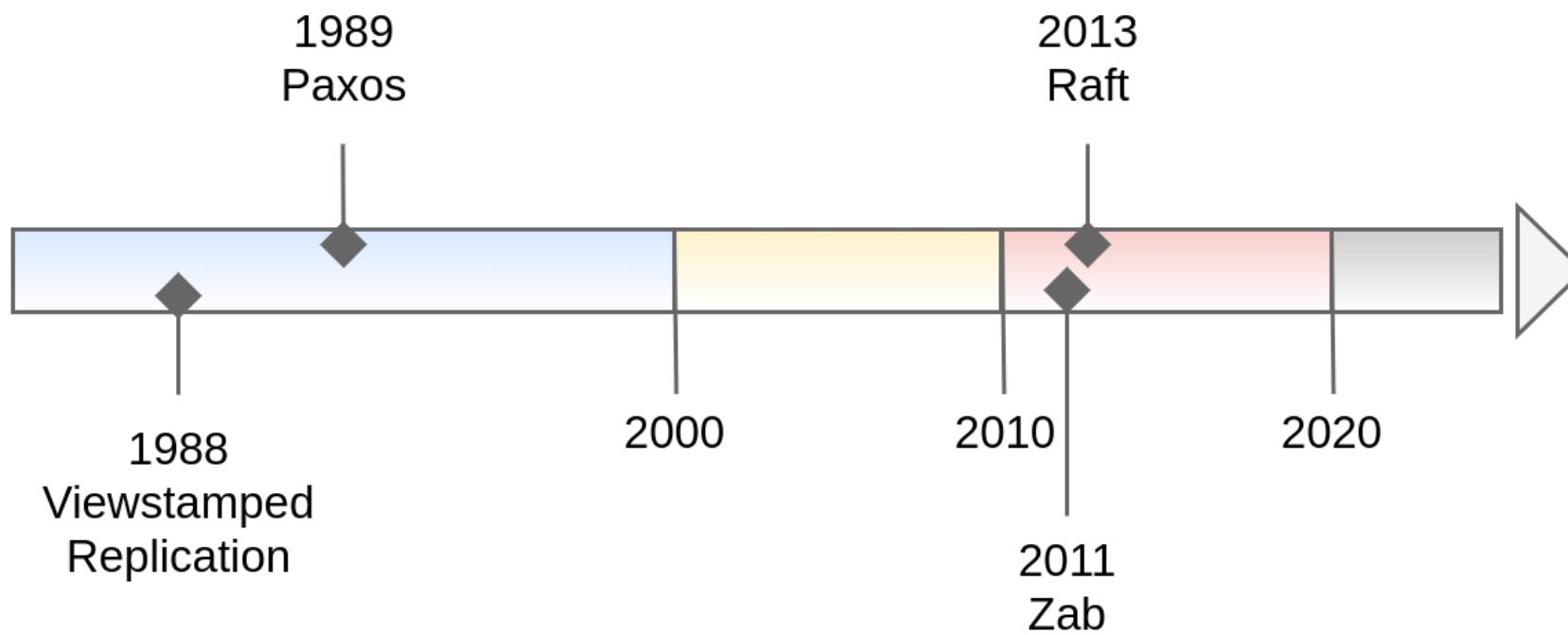
# Неформальное определение

- Алгоритм консенсуса - алгоритм, позволяющий узлам системы достигнуть консенсус, т.е. принять совместное решение **о том или ином** действии
- Под действием понимают **однократное** изменение регистра (например, в Paxos)
- С точки зрения отказов рассматривают только non-Byzantine faults
- P.S. А еще есть "скандальный" FLP result (1985)

## Связь с linearizability

- На практике консенсус нужен на **последовательности** действий
- Поэтому для реализаций встречается определение atomic broadcast (total order broadcast) - консенсус тут нужен для принятия решения о следующем действии
- Можно показать, что linearizability и total order broadcast можно свести друг к другу
- А значит, мы говорим о CP системах, с точки зрения пресловутой CAP теоремы

# Краткий список алгоритмов консенсуса



Paxos и его подвиды: Chubby, Spanner

Raft: Consul, etcd, Hazelcast, RethinkDB, TiKV и т.д.

Zab: ZooKeeper

# Верификация корректности: теория

- **TLA+** (L.Lamport)
- Язык для моделирования программ и систем, распределенных и не только

```
EXTENDS TLC
```

```
(* --algorithm hello_world
variable s \in {"Hello", "World!"};
begin
  A:
    print s;
end algorithm; *)
```

# Верификация корректности: практика

- [Jepsen](#) (K.Kingsbury a.k.a. aphyr)

```
INFO jepsen.core - Analysis invalid! (/ᐃ益ᐃ) / 𐀀𐀀
```



# Применение алгоритмов консенсуса

- Хранилище пар ключ-значение
- Распределенные lock'и\*
- Выбор лидера
- Ограничения (например, на уникальность)
- Атомарный коммит (распределенные транзакции)



## Темная сторона алгоритмов консенсуса

- Производительность напрямую зависит от задержек сети
- Высокая сложность реализации и верификации
- Для работы кластера требуется строгое большинство узлов (что логично)



## ➤ История: Paxos и его подвиды, Raft

# Vanilla Paxos

- Paxos (1998) - p2p (leaderless)
- В основе - Synod/Single-Decree Paxos
- Позволяет принять строго одно решение (о значении регистра)
- Часто под Paxos подразумевают семейство алгоритмов

# Подвиды Paxos

- Multipaxos (2001)
- FastPaxos (2004~2005)
- Generalized Paxos (2004~2005)
- Mencius (2008)
- Multicoordinated Paxos (2006)
- Vertical Paxos (2009)
- Ring Paxos (2010) / Multi-Ring Paxos (2010)
- SPaxos (2012) / EPaxos (2013) / FPaxos (2016) / KPaxos (2017) / WPaxos (2017)
- **CASPaxos** (2018)
- SDPaxos (2018)

# Raft

- Raft (2013) - single leader, replicated log
- Время делится на периоды (term), каждый из которых начинается с выбора лидера
- Упор сделан на простоту понимания алгоритма
- <https://raft.github.io>

➤ CASРахос, как один  
из недавних Рахос-образных

# CASPaxos

- CASPaxos (D.Rystsov, 2018) - p2p, replicated state
- CAS - compare-and-set/compare-and-swap
- Модифицирует Paxos (Synod), а не просто использует его как компонент для построения системы

# ОСНОВЫ CASPaXos

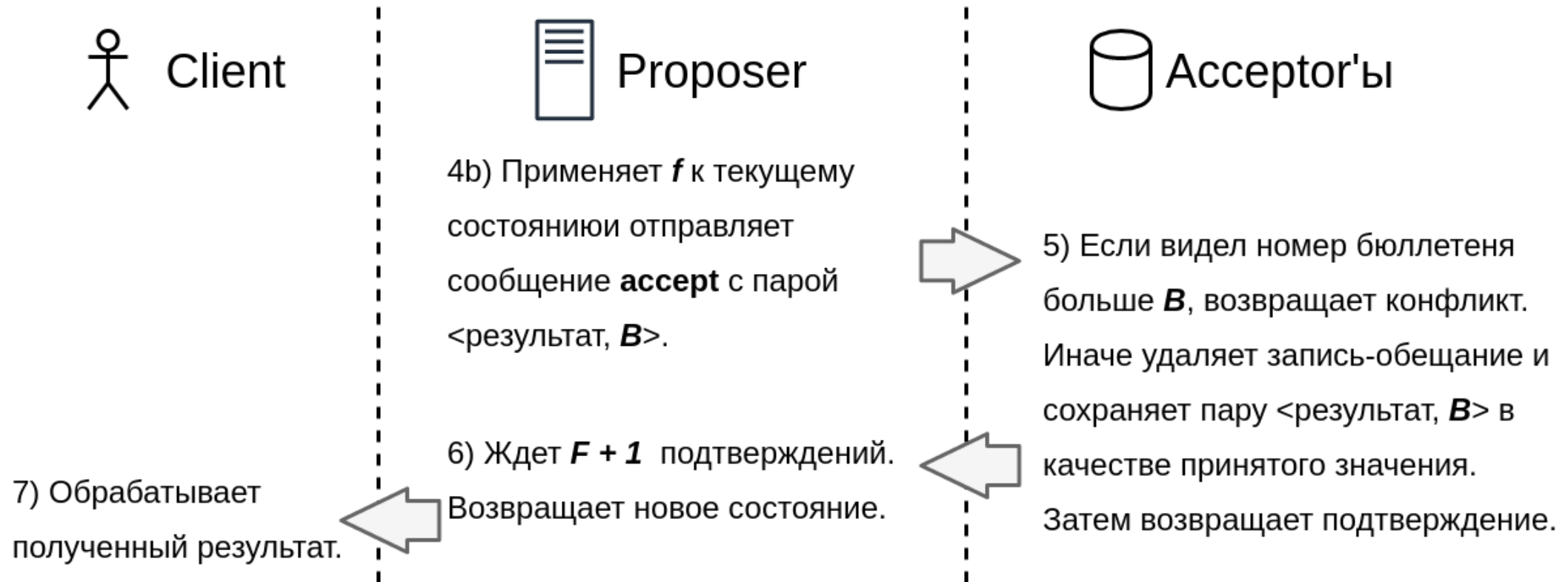
- Использует один регистр (объект)
- Вводит несколько ролей для процессов:
  - Clients: клиенты системы, отправляют запросы к Proposer
  - Proposers: принимают запросы клиентов, генерируют уникальные номера (proposal ID) и общаются с Acceptors
  - Acceptors: могут принимать предложения Proposers, хранят принятое состояние
- Для сохранения работоспособности системы до  $F$  отказов, нужны  $2F + 1$  Acceptors



# Фаза 1



## Фаза 2



## Связь с Synod

CASPaXOS эквивалентен Synod, если взять функцию:

```
x -> if x =  $\emptyset$  then val0 else x
```

# CAS регистр на основе CASPaxos

Чтение:

```
x -> x
```

Инициализация значением `val0` :

```
x -> if x =  $\emptyset$  then (0, val0) else x
```

Запись значения `val1` при условии версии `3` :

```
x -> if x = (3, *) then (4, val1) else x
```

## CASPaxos-based key-value storage

- Хранилище - это набор именованных экземпляров CASPaxos, по одному на ключ
- Преимущества и недостатки подхода в сравнении с тем же Raft выходят за рамки доклада

## Рет-проект: CASPaxos на Node.js

<https://github.com/gryadka/js> (Node.js - proposers, Redis - acceptors)

||

V

<https://github.com/puzpuzpuz/ogorod> (Node.js - proposers & acceptors)

# Ogorod TODOs

- Применить оптимизации для Paxos, например, CASPaxos 1RTT
- Поддержка динамической конфигурации, включая версионирование и сохранение на диск
- Поддержка операции delete. Нужен фоновый процесс аля GC (см. статью)
- Интеграция со встраиваемым хранилищем ключ-значение, например, RocksDB
- Перейти с коммуникации для внутренних нужд по HTTP к plain TCP
- Обработка ошибок и логирование
- И много чего еще



## Призыв к действию

- Распределенных систем бояться - на server-side не ходить
- Все, кому интересны высокопроизводительные библиотеки (и распределенные системы) - welcome
- <https://github.com/hazelcast/hazelcast-nodejs-client>
- P.S. Contributions are welcome as well



**Спасибо за внимание!**



## Полезные книги и ссылки

- Designing Data-Intensive Applications, Martin Kleppmann, 2017
- CASPaxos: Replicated State Machines without logs, Denis Rystsov, 2018 - <https://arxiv.org/abs/1802.07000>
- Paxos Made Simple, Leslie Lamport, 2001 - <https://lamport.azurewebsites.net/pubs/paxos-simple.pdf>
- <https://raft.github.io/raft.pdf>
- <https://jepsen.io>
- <https://martin.kleppmann.com/2015/05/11/please-stop-calling-databases-cp-or-ap.html>
- <https://vadosware.io/post/paxosmon-gotta-consensus-them-all/>