Проектирование распределённых приложений, стратегические вопросы

Юрий Литвинов
y.litvinov@spbu.ru

08.12.2022

1. Архитектурные стили распределённых систем

В этой лекции поговорим о «стратегических» аспектах проектирования распределённых (прежде всего, больших облачных) приложений. Начнём с типичных для них архитектурных стилей. Все они в целом строятся либо согласно слоистому стилю, либо согласно разным подвидам событийно-ориентированного стиля, однако в реальной жизни используются обычно более специфичные стили, о них-то и поговорим.

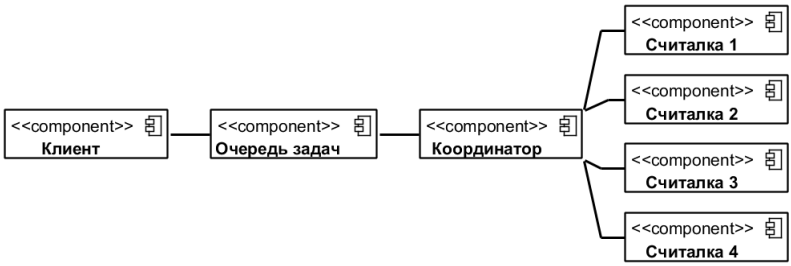
Далее архитектурные стили упорядочены по возрастанию «обычности» для современных облачных приложений (по крайней мере, по мнению автора). Изложение ведётся в основном по архитектурным гайдлайнам платформы Microsoft Azure[1] с аккуратно вырезанными вендор-специфичными штуками, тем не менее, данный обзор не претендует на полноту.

1.1. Big Compute

Архитектурный стиль «Большие вычисления» («Big Compute») предназначен для решения задач, требующих массовой параллельности. Лекционный курс «Параллельное программирование» на матмехе, как говорят, начинается со слов «представим, что у нас есть компьютер с бесконечным количеством процессоров, посмотрим, что на нём можно посчитать» — это и есть типовая ситуация применения Big Compute. Типичные задачи, решаемые в таком стиле — это прежде всего физические или химические расчёты, симуляция, различного рода моделирование, решение огромных дифуров и т.п., то есть задачи, которыми на матмехе активно занимается кафедра параллельных алгоритмов, и которые обычно требуют суперкомпьютер.

Архитектурно подобные системы устроены довольно просто:

[1] Azure Architecture Center, URL: https://docs.microsoft.com/en-us/azure/architecture/ (дата обращения: 11.12.2021).



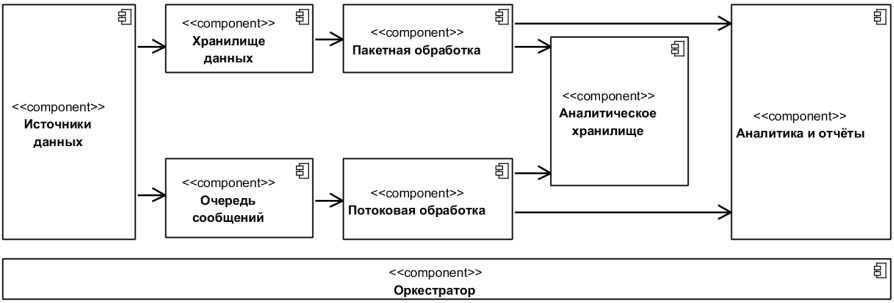
Есть клиент, снабжающий систему данными и запросами, есть очередь задач, куда запросы попадают от клиента, и есть координатор (на самом деле, самая сложная часть системы), который берёт задачи из очереди, делит на подзадачи и раскидывает по вычислительным узлам. Каждый вычислительный узел обычно устроен довольно просто, но интересно то, что их много — от десятков до десятков тысяч. При этом вычисления бывают хорошо параллелизуемыми (в идеале — представимыми в виде Map-Reduce-вычисления), тогда части задачи можно раскидать по узлам и они могут считать, никак не координируясь друг с другом. Когда все узлы закончат обработку, координатор собирает результаты, агрегирует их (возможно, задействуя ещё узлы) и выдаёт ответ. В этом случае каждый узел должен обладать большими ресурсами (прежде всего, процессором, но может потребоваться и оперативная память), но требований к сети почти нет.

Бывают, однако, параллельные задачи, требующие активной координации между узлами. В этом случае требуется также высокопроизводительная сеть, и тогда вычислительные узлы по сути соединены в вычислительный кластер, хоть и могут физически предоставляться облачным провайдером просто из каких-то доступных ресурсов.

Этот архитектурный стиль довольно специфичен, поскольку вычислительно сложные задачи в современном мире относительно редки (зато если вы умеете такое делать, можете просить любую зарплату — для этого на матмехе и учат дифурам и матфизике). Кроме того, требуется «embarrassingly parallel»-задача (что обычно переводится на русский как «чрезвычайно параллельная», но английский термин более точен — настолько параллельная, что даже стыдно), иначе выгоды от параллелизма будет немного. Кроме того, требуются весьма продвинутые и дорогие ресурсы, которые у современных провайдеров облачной инфраструктуры типа AWS или Azure, конечно, есть, но стоить их аренда будет немало (а купить себе небольшой суперкомпьютер и содержать его будет ещё в разы дороже). Однако для таких задач зачастую просто не существует других способов решения, кроме как грубой силой.

1.2. Big Data

Всеми любимые большие данные — это обратная сторона Big Compute, когда вычисления не сложны, просто их очень много. Архитектурный стиль для обработки этих данных применяется, когда они не лезут в обычную СУБД, и структурно на самом деле похож на Big Compute, особенно если данные надо обрабатывать «на лету»:



В любом случае, данные поступают в систему извне, из какого-либо источника (обычно многих разных), где они могут быть представлены в виде, не очень пригодном для обработки, поэтому надо их сначала импортировать. Дальше возможны два варианта:

- данные надо обрабатывать на лету — например, банковские транзакции или показания датчиков; тогда они обычно все кидаются в очередь сообщений (например, Apache Kafka), откуда их параллельно вычитывает несколько потоковых обработчиков (очередь служит и буфером, и балансировщиком нагрузки), обработанные данные попадают в аналитическое хранилище для дальнейшей работы с ними или в отчёты, выдаваемые пользователю (или другим системам);

- данные можно обрабатывать с регулярными интервалами — например, формировать сводки за день; тогда вместо очереди сообщений может использоваться распределённое хранилище, куда данные импортируются из источников, и оттуда они время от времени вычитываются обработчиками (опять-таки, возможно, параллельно).

Поскольку данных заведомо много, требуются механизмы их распределённого хранения и обработки. Писать их с нуля крайне не рекомендуется, потому что простую систему написать, конечно, можно быстро, но как только появляются требования оптимальности загрузки ресурсов, отказоустойчивости и безопасности, внезапно начинает требоваться продвинутая математическая и алгоритмическая теория, которую лучше доверить профессионалам. Примеры готовых решений — Apache Hadoop (с его распределённой системой хранения данных HDFS и распределённой системой обработки MapReduce), Apache Spark (который поновее и побыстрее за счёт хранения данных в памяти). Hadoop хорош для пакетной обработки, Spark тяжелее в настройке и эксплуатации, но хорош для обработки в реальном времени.

Хранение данных тоже не так просто. В традиционных СУБД данные должны соответствовать некоторой схеме, чтобы их можно было даже хранить, однако архитектурный стиль «Big Data» говорит, что это плохо — необходимость конвертации к единому формату может переусложнить систему и потенциально стать узким местом в плане производительности. Поэтому рекомендуют пользоваться принципом Schema-on-read — хранить данные в том виде, в котором они пришли (сырые логи, текстовые документы, таблицы и т.п.), и преобразовывать их в нужный формат уже при чтении для обработки. Это позволит разным обработчикам использовать разные форматы, при этом пользуясь одним общим распределённым хранилищем данных. Для такого хранилища слабоструктурированных или неструктурированных данных есть модный термин «Data Lake», и ему часто

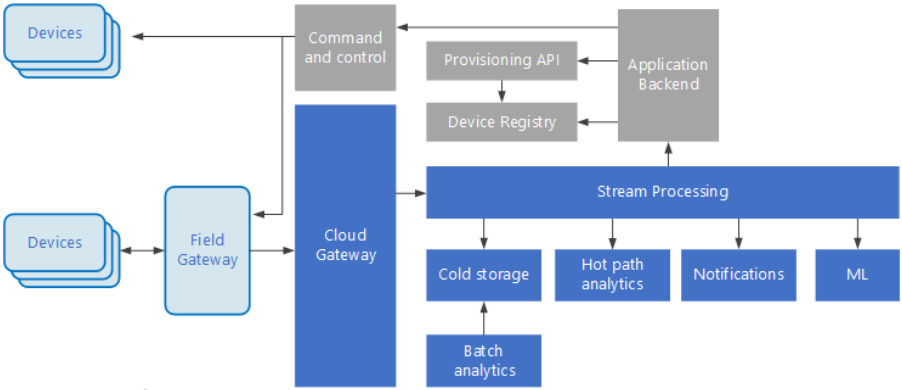
противопоставляют термин «Data Swamp» — когда данные в хранилище есть, но никто не знает, как ими пользоваться, чтобы извлечь что-то полезное.

Вполне возможно, что хранилище данных само может обеспечить предварительную обработку данных (фильтрацию, преобразование, некоторую агрегацию), тогда этим надо пользоваться. Традиционный подход к обработке данных — Extract, Transform, Load (ETL), вместо этого рекомендуется схема Transform, Extract, Load (то есть обработка на стороне хранилища — того же Apache Hadoop, извлечение обработанных данных и загрузка их в аланитическое хранилище).

Если обработка выполняется в пакетном режиме, полезный приём — это делить входные данные по интервалам обработки. Например, если метрики считаются по логам раз в день, настройте систему логирования так, чтобы она раз в день делала ротацию логов[2], и отправляйте на обработку как раз тот кусок данных, который должен быть обработан за один раз. Это несколько упрощает анализ и, если что-то пойдёт не так, упрощает локализацию проблемы.

Ещё один важный практический совет — если считается какая-то агрегатная статистика, личные данные должны удаляться как можно раньше (в идеале — никогда не покидать сам источник данных). Несмотря на все усилия по обеспечению безопасности, данные украдут, и если от этого никто не пострадает, все будут только в выигрыше.

Вот пример применения такого подхода, типичная архитектура систем «интернета вещей»:



© https://github.com/MicrosoftDocs/architecture-center/blob/main/docs/guide/architecture-styles/big-data.md

Устройства (например, охранные датчики, медицинские устройства) передают свои показания на Field Gateway (располагающийся близко к самим устройствам), он выполняет базовую обработку и агрегацию и отправляет данные на Cloud Gateway, находящийся уже в центре обработки данных (если каждое устройство будет слать свои показания прямо в облако, даже облако с этим может не справиться, ну или это будет стоить сказочных денег). Оттуда данные попадают в систему потоковой обработки, которая может делать разные вещи — сохранять данные в «холодное хранилище» для последующей пакетной обработки

[2] Общая практика для систем логирования, когда по достижению определённого размера или прошествию определённого времени лог архивируется и на его месте заводится новый. Например, log4j и log4net так, конечно, умеют — см. RollingFileAppender.

(считать разные статистики, например), анализ в реальном времени, посылать нотификации или скармливать данные разным алгоритмам машинного обучения (например, для детекции аномалий).

Также возможно, хотя и не обязательно, что есть и обратный поток, от облака к устройствам (показано серым на диаграмме). Результаты потоковой обработки попадают в бэкенд, который передаёт команды управления на устройства (возможно, опять-таки через Field Gateway). К тому же, бэкенд отвечает за регистрацию новых устройств и хранение информации об устройствах.

1.3. Событийно-ориентированная архитектура

Событийно-ориентированный стиль, конечно, также применяется для обработки данных в распределённых (в т.ч. облачных) системах. Однако в силу принципиальной ненадёжности сети издатель и подписчики редко связаны напрямую, между ними обычно находится событийная шина. В событийную шину может писать сколько угодно издателей и обработкой событий оттуда может заниматься сколько угодно подписчиков. Стиль архитектурно простой, и существующие решения позволяют сделать такие системы очень производительными, поэтому он часто применяется для обработки событий в реальном времени:

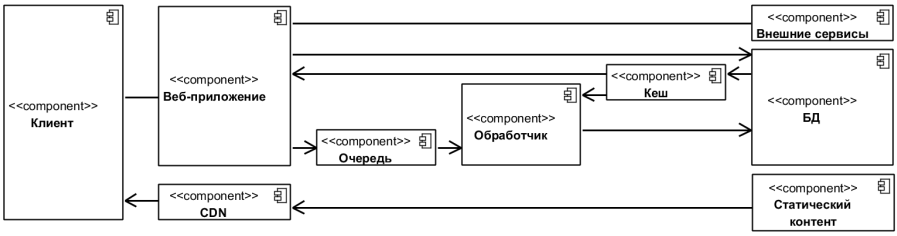
Принципиально моделей обработки событий две.

- Издатель/подписчик — когда сообщение попадает в шину, его забирает и обрабатывает один из подписчиков. В качестве шины может выступать очередь сообщений, имеющая такую семантику, например, RabbitMQ (хотя надо понимать, что их бывает много, например, ZeroMQ более легковесна и поэтому может с успехом применяться в IoT).

- Event Sourcing — когда сообщение попадает в шину и остаётся там навсегда, чтобы кому надо могли прочитать его и обработать — в том числе, вновь подключившийся клиент всегда может проиграть всю историю сообщений с начала, чтобы получить текущую картину мира. Тут в качестве шины могут выступать распределённые логи событий, например, Apache Kafka (хоть они могут быть внешне неотличимы от очередей сообщений). Для быстрой потоковой обработки это считается более прогрессивным подходом, потому что требует меньше координации между участниками взаимодействия и работает быстрее. В этом случае обычно текущее состояние системы в явном виде не хранится, или хранится в виде снапшотов, которые не являются источником истины, а всего лишь ускоряют доступ (то есть реализуется принцип eventual consistency — каждый обработчик может иметь свою картину мира, немного запаздывающую во времени, но рано или поздно все всё вычитают и узнают).

1.4. Web-queue-worker

Web-queue-worker — это некое уточнение событийно-ориентированного стиля, применяемое прежде всего для вычислительно сложных задач, если предметная область относительно несложна и не требует детального моделирования (пакетная обработка каких-то данных, например, типа конвертации pdf-документов). Поскольку это уже «приближенный к земле» стиль разработки веб-приложений, его структура более детальна:



Клиент работает в браузере у пользователя, через него пользователь заказывает выполнение работы. *Веб-приложение* на стороне сервера поддерживает действия клиента, и принимает от него работу. Задания вместе с необходимыми данными попадают в *очередь*, откуда вычитываются *обработчиками*. Результаты обработки сохраняются в *базу данных*, откуда, возможно, через *кеш* читаются веб-приложением (и обработчиками, если им нужны данные из базы). При этом веб-приложение может пользоваться также *внешними веб-сервисами*, а клиент — получать *статический контент* (картинки, скрипты, стили, файлы) через *Content Delivery Network*.

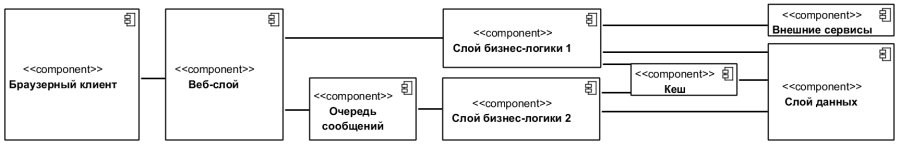
Удивительно, но очередь и обработчик в такой схеме не обязательны — если сложных вычислений нет, всё может делаться самим веб-приложением (и тогда это будет обычной трёхзвенной архитектурой). Однако если надо что-то сложное считать, то очередь очень полезна, поскольку работает буфером, смягчающим эффекты пиковой нагрузки, да ещё и балансировщиком. При этом разделение обработчика и веб-части позволяет масштабировать их независимо, так что если фронт справляется, а вычислительно сложная часть нет, можно отдельно поднять ещё несколько обработчиков, и остановить их, когда в них пропадёт нужда. Обратите внимание, что запросы принципиально выполняются асинхронно, то есть заставлять пользователя ждать, пока придёт ответ, тут пагубная практика.

Кроме того, такая архитектура позволяет эффективно использовать уже готовые технологии — например, веб-приложение на ASP.NET или Spring, очередь RabbitMQ, обработчик в виде веб-сервиса на том же ASP.NET, читающего из очереди, MariaDB в качестве БД и Redis в качестве кеша. При этом можно использовать готовые CDN для, например, React и стилей Bootstrap. Если знать, что делать, собрать такую штуку можно за выходные, почему Web-Queue-Worker и популярен в продакшене.

Однако за всё надо платить, при росте сложности предметной области начинает разрастаться либо веб-часть, либо обработчик, либо и то и другое. Очень легко пропустить тот момент, когда такое приложение превратится в большой бесформенный клубок кода, который невозможно больше поддерживать. В этом случае поможет более аккуратная декомпозиция ответственности, предполагаемая следующими архитектурными стилями.

1.5. N-звенная архитектура

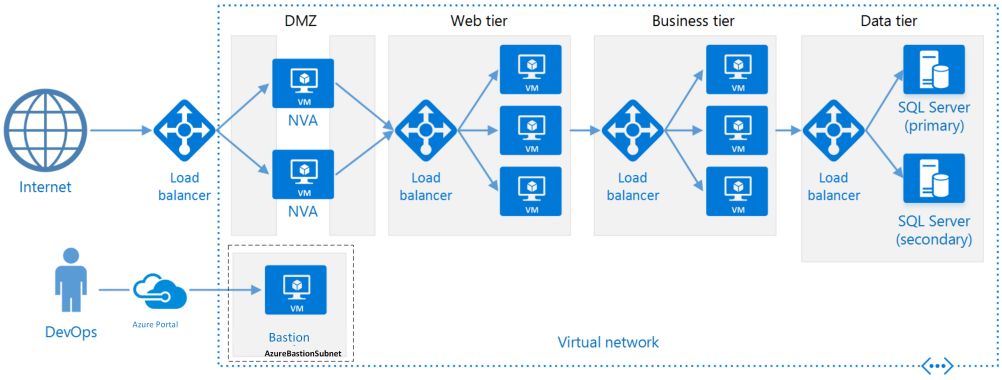
Знаменитая N-звенная архитектура, разумеется, в облачных приложениях тоже вполне используется:



Браузерный клиент, что не удивительно, работает в браузере у пользователя (это может быть одностраничное приложение на чём-нибудь вроде React или Vue, может быть и многостраничное на каком-нибудь из серверных веб-фреймворков). *Веб-слой* поддерживает клиентское приложение и, возможно, обрабатывает асинхронные запросы. Веб-слой общается со слоем *бизнес-логики*, который может быть сколь угодно сложно устроен (например, как на рисунке, их может быть два, и один из них подключен через очередь сообщений, но это не требование стиля, а только пример). Слой бизнес-логики общается с *внешними сервисами* и *слоем данных*, при этом слой данных может быть доступен на чтение через кеш (если это повысит производительность, конечно). Особенностью этого стиля является то, что компоненты приложения обычно физически размещаются на разных машинах, что помогает в масштабируемости и надёжности.

Такой архитектурный стиль хорош, когда у вас уже есть монолитное приложение, работающее на вашем любимом сервере, и вы хотите с минимумом трудозатрат перенести его куда-нибудь на AWS. Либо бизнес-логика несложная (но всё же требует некоторой структуризации, так что Web-Queue-Worker не подойдёт). Однако масштабировать при таком подходе можно только крупные куски системы, так что если ваша бизнес-логика содержит два метода, одним из которых никто никогда не пользуется, а один не справляется с нагрузкой, вы должны запустить второй экземпляр сервера бизнес-логики целиком. Ещё, как обычно, слой бизнес-логики имеет тенденцию разрастаться и превращаться в большой ком грязи.

Вот пример типичного N-звенного веб-приложения на Azure, использующего стек технологий от Microsoft:



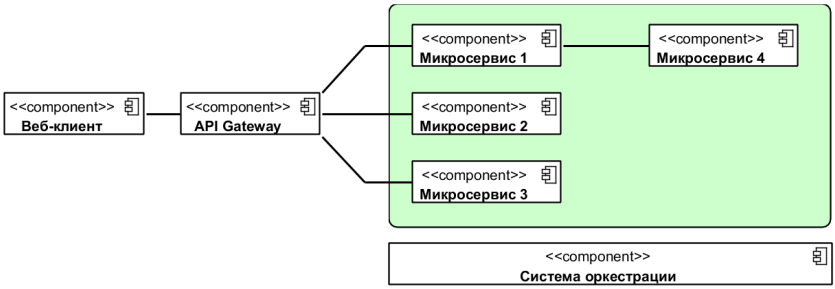
На входе стоит балансировщик нагрузки, перекидывающий запросы на сервера Network Virtual Appliances внутри Demilitarized Zone, обеспечивающие безопасность (инспекцию пакетов, файерволл и т.п.). Это всё готовые компоненты, которые надо просто подключить к инфраструктуре. Всё остальное происходит внутри виртуальной сети, доступа к машинам которой снаружи нет (есть ещё админский доступ через Bastion — по сути, ssh-сервер, с которого после прохождения всей необходимой авторизации можно ходить на другие машины в виртуальной сети). За DMZ находится пул виртуальных машин вебчасти, за которым — пул виртуалов бизнес-части, за которым — кластер с СУБД (который может заниматься просто репликацией, тогда балансировщик нагрузки единственное, что делает — переключает на горячую копию, если основная СУБД померла; а может заниматься продвинутым шардированием, о чём чуть позже).

Каждый из слоёв системы состоит из виртуальных машин за балансировщиком нагрузки — во-первых, для повышения производительности, во-вторых, для надёжности (если одна машина умрёт, балансировщик просто не будет направлять ей запросы, так что её смерть никто извне не заметит), в-третьих, для масштабируемости. Изначально в пуле может быть только одна виртуалка, но если она перестаёт справляться, может динамически запускаться вторая и брать на себя работу с помощью балансировщика. Запускать новую машину в пуле можно руками, а можно и автоматически, при достижении критического значения какой-то из метрик (например, загруженности процессора выше 80%), для чего облачные провайдеры имеют развитые средства мониторинга состояния виртуальных машин.

С инфраструктурой, тем более её автоматическим масштабированием, однако, надо быть осторожными, поскольку аренда виртуальных машин и прочих штук типа балансировщиков нагрузки, стоит денег, и иногда немалых. Сначала следует определиться с бизнес-целями — принесёт ли обеспечение дополнительной надёжности и производительности приложения достаточно денег, чтобы покрыть расходы на инфраструктуру.

1.6. Микросервисная архитектура

Микросервисная архитектура на данный момент самая популярная для распределённых приложений, хотя архитектурная мода как маятник раскачивается между микросервисными и монолитными приложениями. Микросервисный подход предлагает делить приложение на маленькие куски, каждый из которых представляет собой отдельный вебсервис и достаточно мал по размеру, чтобы его «мог написать один человек за две недели» (на самом деле, в реальной жизни микросервисы обычно побольше — подходящего размера, чтобы один микросервис могла разработать и сопровождать одна небольшая команда, но зависит от конкретного проекта, конечно). Микросервис имеет свою модель предметной области и является ограниченным контекстом с точки зрения предметно-ориентированного проектирования. Итоговое приложение собирается из микросервисов, вызывающих друг друга:



Как обычно, есть *веб-клиент*, который шлёт запросы на *API Gateway*. Также вполне может быть и выделенная веб-серверная часть, а может и не быть — отдаваемая клиенту страница может собираться из элементов, предоставляемых отдельно каждым микросервисом. Gateway не содержит никакой бизнес-логики, а просто перенаправляет запросы внутрь виртуальной сети, где работают микросервисы, и нужен прежде всего для того, чтобы у клиента был один фасад для всего приложения, и ему не надо было знать адреса отдельных частей. *Система оркестрации* (например, Docker Compose или Kubernetes) управляет временем жизни микросервисов, масштабированием, балансировкой нагрузки, мониторингом и т.п. — для микросервисных приложений это на самом деле очень важная вещь, поскольку сложность системы во многом определяется не реализацией самих микросервисов, а связями между ними.

Этот архитектурный стиль успешно применяется для предметных областей произвольной сложности (начиная с небольших приложений наподобие HwProj 2, где микросервисов меньше десятка, заканчивая гигантскими системами типа Facebook, с сотнями разных микросервисов).

Особенности микросервисного подхода таковы:

- Поскольку каждый микросервис — это отдельное приложение, он может быть написан на своём языке и стеке технологий, независимо от других. Хорошо это или плохо, открытый вопрос, потому что с одной стороны, это позволяет каждому писать на языке, на котором он наиболее продуктивен, с другой стороны, зоопарк из технологий усложняет поддержание инфраструктуры разработки. Но поскольку любой сервис можно переписать за две недели, это не то чтобы большая проблема.

- Каждый микросервис хранит свои данные сам, не имеет право разделять схему данных с другими. В этом смысле микросервис схож с объектом из классического ООП, то есть имеет своё внутреннее состояние и внешнее поведение. Обмениваться данными с другими микросервисами, конечно, можно, но только через публичный интерфейс. Это позволяет микросервисам выбирать наиболее эффективные способы хранения данных — не требуется поднимать один на всё приложение настоящий сервер с СУБД, как в N-звенной архитектуре, можно обойтись легковесными решениями типа SQLite или выбрать подходящую NoSQL-базу (но помните про масштабирование, все реплики одного микросервиса должны быть согласованы — проще всего это обеспечить, если сам микросервис состояния не имеет вовсе, но можно иметь СУБД, на которую смотрят все реплики).

- Каждый микросервис может быть масштабирован независимо, причём это делают даже не специальные балансировщики нагрузки, как в случае с N-звенной архитектурой, а сами оркестраторы, которые всё равно нужны и всё равно всем управляют. Так что если у вас есть функция, которая никому не нужна, запустите одну реплику с ней и пусть будет, и если есть функция, которая не справляется со своей работой, запустите хоть десять реплик только для неё. Микросервисы обычно работают в контейнерах, а не на виртуальных машинах, так что это ещё и дешевле, если делается на арендованных облачных мощностях.

- Каждый микросервис может быть задеплоен независимо от остальных, если его внешний интерфейс не менялся, так что циклы разработки и релизы отдельных микросервисов не должны быть согласованы. В отличие от монолита, где один маленький баг может задерживать релиз всей системы. ДАже если внешние интерфейсы менялись, согласовывать развёртывание надо только с соседними командами, а не со всем проектом. Поэтому микросервисные системы могут позволить себе по несколько релизов *в день* и даже подход «любой коммит сразу в production».

- Каждый микросервис падает отдельно, так что если вся система написана с расчётом на то, что любой компонент может отказать, любой сбой может быть легко локализован и не приведёт (по идее) к отказу всей системы.

- Микросервисы на то и микро, чтобы кодовая база каждого была очень маленькой и простой, что позитивно сказывается на стоимости сопровождения.

Однако, конечно, за всё надо платить. У микросервисного архитектурного стиля достаточно и недостатков. Прежде всего то, что сложность приложения перекладывается с кода на оркестрацию. А это не очень хорошо, потому что языки и приёмы программирования эволюционируют уже почти столетие, а технологии для конфигурирования взаимодействия микросервисов, в целом, только в начале пути. Так что зависимости между микросервисами могут быть неочевидны, их трудно отлаживать и мониторить, требуется набор специальных знаний и навыков, развитая культура DevOps во всей организации. Кроме того, само по себе микросервисное приложение сложнее эквивалентного по функциональности приложения в других стилях, в силу большего оверхеда на всякие инфраструктурные задачи. Да и разработка/тестирование сложнее, поскольку требуется либо куча mock-объектов, либо умение быстро поднимать и запускать все зависимости.

Кроме того, микросервисные приложения гораздо более требовательны к сетевой инфраструктуре, поскольку куча вызовов, которые в других стилях делаются локально, в микросервисном стиле сетевые (поэтому, кстати, не получится взять монолит и сделать каждый класс микросервисом — сеть ляжет). Обычно все микросервисы находятся внутри одной сети облачного провайдера, и там могут применяться очень скоростные соединения (например, InfiniBand, где скорость передачи измеряется в сотнях гигабит в секунду), но всё же.

Наличие отдельных хранилищ данных для каждого микросервиса хорошо в плане сокрытия деталей реализации и обеспечения скорости работы, но плохо в плане поддержания целостности данных (тем более с учётом возможных отказов). Так что целостность данных гарантировать обычно даже не пытаются, строя архитектуру из семантики eventual consistency — все данные будут консистентны когда-то в будущем.

2. REST

Большинство современных веб-сервисов использует архитектурный стиль REST для реализации публичного API, а микросервисы его особенно любят: REST легковесен и прост, и при аккуратном использовании может уменьшить нагрузку на сеть, слабое место микросервисов. Поэтому про REST стоит рассказать поподробнее.

REST расшифровывается как Representational State Transfer, название, предложенное в 2000 году Roy Fielding в его докторской диссертации (!). Означает оно то, что представление состояния приложения передаётся от сервера клиенту и, при последующих запросах, от клиента к серверу, и именно это представление полностью определяет состояние протокола взаимодействия — сервер не вправе хранить информацию о клиентской сессии. Вообще, REST-сервис в общем случае архитектурно представляет собой конечный автомат, который в ответ на запрос со стороны клиента выполняет некое действие и возвращает клиенту представление следующего состояния, в котором он оказался (в смысле сервер — это такой универсальный автомат, который сам состояние не хранит, но по переданному с клиента состоянию и действию выполняет переход в следующее состояние). Хороший REST-сервис ещё и должен возвращать информацию о том, какими запросами можно попасть в следующее состояние, то есть что ещё можно сделать, но обычно никто не заморачивается, и вообще даже про состояния никто не знает. Что важно — это то, что клиент хранит всю информацию о сессии у себя, так что сервису вообще всё равно, общаются с ним с одной машины или с десятка разных, лишь бы они правильные запросы присылали.

REST помимо этого архитектурного ограничения ещё и стандартизует виды запросов и требует активного использования семантики HTTP (хотя, опять-таки, формально REST не привязан к HTTP, и Fielding, наверное, в шоке от того, что с его идеей сделала индустрия, но ему грех жаловаться — вопросов о практической значимости на защите диссера к нему быть не могло). Запросы намеренно очень просты, большинство REST-сервисов могут совершать содержательную работу, используя обычный HTTP GET хоть через адресную строку браузера. Параметры запроса могут передаваться прямо в URL, как параметры адреса (через «?» и «&»), результат — это просто код возврата HTTP. В более сложных случаях может использоваться тело запроса, и, хотя REST не специфицирует явно протокол сериализации, обычно используется что-то простое и немногословное, в основном JSON (хотя бывает и protobuf).

Отсутствие информации о сессии на стороне сервера и передача параметров запроса в URL даёт возможность активно использовать кеширование. Если операция предполагает только чтение и данные на сервере заведомо не менялись, сервер можно даже не беспокоить (например, веб-сервис, возвращающий погоду, можно не дёргать каждые две минуты, а задать политику кеша, говорящую обновлять информацию только каждые пару часов). Правильная политика кеширования (кеш на стороне сервера, на стороне клиента и иногда где-нибудь посередине) может очень позитивно сказаться на скорости работы всей системы. А если вспомнить про то, что REST может использоваться для коммуникации сотен микросервисов в распределённой системе, то станет понятно, почему это свойство так важно для REST.

2.1. REST-интерфейс

Все REST-сервисы строятся вокруг понятия *ресурса* — обычно это какие-то данные, с которыми работает сервис, но могут быть и более абстрактные вещи. Ресурсы могут быть объединены в *коллекции*. Имя коллекции и/или идентификатор ресурса указывается в URL запроса, HTTP-метод определяет, что мы хотим с ним сделать. Например, GET-запрос на `http://api.example.com/customers/` вернёт нам список ресурсов в коллекции customers, GET на `http://api.example.com/customers/17` вернёт подробную информацию о покупателе с id-шником 17, а DELETE на `http://api.example.com/customers/17` скажет сервису этого покупателя удалить. Стандартная семантика HTTP-методов в REST такова:

- **GET** — для коллекций: получить список всех ресурсов в коллекции, для элементов: получить подробную информацию об элементе;
- **POST** — для коллекций: создать новый элемент в коллекции, по информации из тела запроса, для элементов: неприменимо;
- **PUT** (или **PATCH**) — для коллекций: обновить все элементы (возможно, подходящие под некий критерий поиска, передаваемый в запросе же), для элементов: обновить информацию об элементе, если он существует; в варианте с PATCH изменения предполагаются более локальные, то есть меняется только несколько полей, PUT обычно меняет весь элемент целиком;
- **DELETE** — для коллекций: удалить всю коллекцию, для элементов: удалить элемент.

При этом в ответах используются стандартные коды ошибок HTTP, наиболее частые:

- 200 — всё ок, в теле результат операции (для *запросов*);
- 201 — ресурс успешно создан на сервере;
- 204 — всё ок, операция не предполагает передачу на клиент результата, так что ответа нет (для *команд*);
- 404 — ресурс не найден;
- 400 — неверный запрос со стороны клиента;
- 409 — конфликт (например, запрос корректен, но обновление невозможно, потому что нарушит ограничения целостности).

Например, Google Drive REST API:

- GET https://www.googleapis.com/drive/v3/files — получить список всех файлов на аккаунте пользователя (Google Drive не раскладывает файлы по папкам на самом деле, и изначально папка была чем-то вроде метки, файл мог принадлежать нескольким папкам сразу, но это потом убрали);
- GET https://www.googleapis.com/drive/v3/files/fileId — получить метаданные файла по его Id, который мы могли узнать из предыдущего запроса;

- POST https://www.googleapis.com/upload/drive/v3/files — загрузить новый файл, возвращает его Id;
- PATCH https://www.googleapis.com/upload/drive/v3/files/fileId — обновить файл;
- DELETE https://www.googleapis.com/drive/v3/files/fileId — удалить файл.

Напомним, что данные, необходимые для исполнения запроса, передаются прямо в URL, так что GET-запрос на получение файла может выглядеть, например, вот так: `https://content.googleapis.com/drive/v3/files/1R6CWjI7Mc7F3oTPtLdXcmChw3Q0qkBtiu495FeKzwzM?acknowledgeAbuse=true&fields=*&key=Agzasyaa8yy0GdcGPHdtD083HiGGx_S4vmPSSDM`. Если всё пройдёт хорошо (что вряд ли, запрос требует авторизации, поэтому key должен содержать валидный ключ доступа, что требует авторизации по OAuth 2 — но это тоже REST-сервис).

2.2. Правила дизайна хорошего REST-сервиса

Вот некоторые рекомендации по архитектуре API вашего REST-сервиса, чтобы он был действительно REST и им было удобно пользоваться:

- API строится вокруг ресурсов, а не действий. Например, `http://api.example.com/customers/` — хорошо, а `http://api.example.com/get_customer/` — плохо. Действия — это методы HTTP, не элементы сервиса.
- Отношения между сущностями могут быть также выражены в URL как ресурсы. Например, `http://api.example.com/customers/5/orders` может быть коллекцией всех заказов покупателя номер 5. Соответственно, можно добавить заказ, изменить и удалить заказ конкретно для нужного покупателя. Однако увлекаться не надо, URL вида `http://api.example.com/customers/1/orders/99/products` уже считаются плохой практикой. Если клиенту требуется больше одного раза пройти по ссылке, пусть делает несколько запросов — сначала получит Id нужного заказа, потом сделает запрос к общей коллекции orders, предъявив Id, и уже оттуда получит информацию о продуктах.
- API сервиса — это модель предметной области, а не данных. Вообще, API сервиса, как в обычном ООП, не должно раскрывать деталей реализации, как бы ни было велико искушение напрямую отобразить запросы в таблицы в БД.
- Используйте стандартную семантику HTTP — например, заголовки. HTTP имеет стандартный заголовок Content-Type — его можно использовать, чтобы указать формат сериализации. И заголовок Accept — чтобы в запросе указать желаемый формат сериализации ответа, например:

  ```
  GET http://api.example.com/orders/2 HTTP/1.1
  Accept: application/json
  ```

  Не забывайте также про стандартные коды ошибок — можно просто выбирать наиболее подходящие по смыслу и использовать их.

- Хороший сервис, если он предоставляет доступ к потенциально большим коллекциям, должен предоставлять механизмы фильтрации и «пагинации». Фильтрация позволяет указать, какие элементы нас интересуют, и какая информация про них нам нужна (например, в Google Drive API есть поле fields, которое мы в примере выше указали как «*», то есть «вернуть всё», но могли бы указать, например, только name), чтобы не возвращать кучу бесполезных данных и забивать сеть. Пагинация позволяет получать информацию небольшими порциями, например, по 30 элементов. Тогда в запросе можно будет передавать сколько элементов мы хотим, и начиная с какого. В Google Drive API это параметры pageSize и pageToken. Нелишне, если это может понадобиться, добавить и опцию сортировки — например, в Google Drive API есть параметр orderBy у запроса list.

- Если элементы сами могут быть большими по размеру, может быть полезна поддержка механизма Partial Content HTTP. Запрос HTTP HEAD в таком случае должен возвращать длину передаваемых данных, но не отдавать сами данные. Клиент, зная длину, может делать GET-запрос с заголовком Range, передавая диапазон байтов, которые хочет получить. Это позволит клиенту получать данные по частям, отменять скачивание и продолжать скачивание после отмены, что всегда позитивно.

- Совсем уж хороший веб-сервис должен предоставлять клиенту информацию о связанных с последним запросом возможных операциях. Это называется Hypertext as the Engine of Application State (HATEOAS) (то есть анонсирование возможных переходов в конечном автомате REST-сервиса через HTTP), и выглядит как-то так (например, в ответ на запрос о продукте в заказе):

```
{
    "orderID":3,
    "productID":2,
    "quantity":4,
    "orderValue":16.60,
    "links":[
        {
        "rel":"customer",
        "href":"http://api.example.com/customers/3",
        "action":"GET",
        "types":["text/xml","application/json"]
        },
        ...
}
```

  По задумке это позволяет клиенту динамически получать информацию о сервисе, и в идеале если вы можете выполнить один запрос к сервису, вы можете обнаружить по ссылкам и все остальные (сродни WSDL-описанию в SOAP). Однако ни один известный автору сервис этого не поддерживает, а сам формат выдачи HATEOAS-ссылок не стандартизован.

- Хороший веб-сервис будет эволюционировать и менять свой API. Поэтому ему требуется механизм версионирования, который бы позволял старым клиентам продол-

жать работать. Есть сразу несколько подходов к версионированию, большинство из них сводится к тому, что все версии сервиса запускаются одновременно и есть какой-то механизм, позволяющий понять, к какой версии выполняется запрос. Например, в Google Drive API «v3» в URL означает, что это запрос к API третьей версии. Коллеги из Microsoft пишут, что это не только не единственный, но даже и не лучший вариант, но подробности, если интересно, можно посмотреть в первоисточнике[3].

3. Общие принципы проектирования распределённых приложений

Далее обсудим несколько важных принципов проектирования распределённых приложений. Список, опять-таки, не исчерпывающий.

3.1. Самовосстановление

Как вы, наверное, помните из предыдущей лекции, сеть принципиально ненадёжна, поэтому любое распределённое приложение должно проектироваться с учётом отказов. Отказы бывают временными, связанными с короткой потерей соединения или просто потерей пакетов. Бывают отказы, связанные с тем, что нужный нам сервис не работает совсем (например, пропало электричество в том месте, где он задеплоен).А бывают отказы, связанные с тем, что сервис просто не успевает обрабатывать запросы. Разные виды отказов требуют разных стратегий восстановления.

С временными отказами борются повторением запросов. При этом надо уметь отличать временный отказ от постоянного — например, если неверный пароль при аутентификации, повторением делу не поможешь. Если ошибка кажется временной, можно повторить запрос, потом подождать некоторое время, повторить его снова, подождать вдвое большее время, повторить снова и т.д., пока не исчерпается количество попыток (стратегия «экспоненциального отката»). Основная проблема с этой стратегией в том, что это надо делать при вообще каждом сетевом запросе, и, поскольку требуется некое знание предметной области в плане установления «временности» отказа, это обычно не делают библиотеки.

Если отказ вызван невозможностью сервиса исполнять запросы, например, из-за его перегруженности или временного выхода из строя, то огромное количество повторов (от каждого клиента) только усугубит ситуацию. Чтобы так не было, применяют паттерн «Circuit Breaker» — прокси-объект, который может находиться в трёх состояниях:

- Closed — все запросы направляются сервису как обычно. Если кто-то из них завершается с ошибкой, увеличивается счётчик ошибок, а если счётчик ошибок превысил допустимое значение, Circuit Breaker переходит в состояние Open
- Open — запросы не отправляются сервису, Circuit Breaker сам выбрасывает исключение. При переходе в состояние Open запускается таймер, по истечении которого Circuit Breaker переходит в состояние Half-Open

[3] RESTful web API design, https://github.com/microsoftdocs/architecture-center/blob/main/docs/best-practices/api-design.md (дата обращения: 12.12.2021).

- Half-Open — некоторое небольшое количество запросов отправляется на проксируемый сервис. Если они заканчиваются успешно, Circuit Breaker переходит в состояние Closed (и сбрасывает счётчик ошибок), иначе в Open (и перезапускает таймер).

Circuit Breaker вполне можно применять вместе с повторами, но, возможно, имеет смысл сделать механизм, позволяющий коду, выполняющему повторы, понять, что Circuit Breaker «разомкнул цепь» и повторы делать уже нет смысла.

Полезно для детекции ошибок также иметь методы API для самодиагностики сервиса. Начиная от просто чего-то в духе ping, когда если сервис ответил кодом 200 или 204 на HTTP-запрос, он жив. Заканчивая методом, возвращающим текущий статус сервиса с точки зрения бизнес-логики (типа длины очереди запросов, среднего времени обработки, количества записей в базе и т.п.). Такие методы могут использоваться как самим вашим приложением, так и оркестратором для управления масштабированием и перезапуска сервиса (Kubernetes, например, так умеет).

Также помогает ограничить последствия сбоев практика разделения ресурсов приложения на изолированные группы. Например, если два сервиса запускаются на одной машине, и один из сервисов из-за ошибки сжирает все ресурсы процессора, второй сервис тоже перестаёт работать. Желательно делать так, чтобы даже если один сервис захватил все доступные ему ресурсы, система в целом продолжала работать. Тут, опять-таки, могут помочь оркестраторы, позволяющие лимитировать ресурсы под каждый сервис.

В случае, если запросы поступают на обработку неравномерно (например, университетская столовка имеет некоторые проблемы с пропускной способностью в начале большого перерыва, тогда как в остальное время почти не загружена), необходима буферизация запросов. Используйте очереди сообщений для буферизации, чтобы смягчить пики нагрузки — время обработки увеличится, но, по крайней мере, все запросы рано или поздно будут обработаны. Лучше ограничивать длину очередей, чтобы если нагрузка радикально превышает возможности по её обработке, некоторые клиенты получали бы отказы в обслуживании, а не вся система падала.

Если для какого-то сервиса важна отказоустойчивость, имеет смысл запустить сразу два (как минимум) его экземпляра. И иметь механизм автоматического переключения на резервный экземпляр при недоступности основного. При этом переключение обратно обычно делается вручную, чтобы иметь возможность убедиться, что работоспособность основного экземпляра полностью восстановлена и он не начнёт портить пользовательские данные. В идеале резервный экземпляр должен находиться в другом регионе (это полезно в случае ядерной войны США и Китая — сервера в Австралии спокойно продолжат обслуживать ваших клиентов, даже если основной экземпляр приложения будет вместе с датацентром в Нью-Йорке превращён в расплавленное стекло; и в более прозаических сценариях, например, в случае, если строители экскаватором разорвут магистральное оптоволокно — в СПбГУ такое случалось). Правда, резервный экземпляр большую часть времени не работает, а деньги за него платить надо, особенно за деплой в разных регионах облачные провайдеры любят взимать особую плату.

Ещё один приём повышения надёжности — промежуточное сохранение длительных операций (checkpoints). Если что-то пойдёт не так, при перезапуске сервис сможет продолжить работу с промежуточного состояния, а не начинать всё заново.

Если, однако, несмотря на все усилия система всё-таки отказала, она должна делать это плавно и постепенно (то, что в англоязычной литературе называется «Graceful

degradation»). Например, микросервис изображений товаров в интернет-магазине может отказать, тогда магазин должен показывать изображения-заглушки и продолжать работать. Или вот без микросервиса рекомендаций можно обойтись — да, несколько клиентов получат несколько худший сервис, чем обычно, но смогут пользоваться системой, пока сервис перезапускается. Остальные ничего даже не заметят.

Что интересно, современная архитектурная мысль сошлась к тому, что надо самостоятельно вносить отказы, чтобы убедиться в работоспособности системы. Есть практики раз в месяц грохать продакшн и поднимать систему из бэкапов, причём каждый раз это должен делать случайно выбранный член команды — чтобы убедиться, что система корректно переходит на резервные сервисы, и что все в команде знают, как поднять основной экземпляр. Так что когда случится настоящая проблема, любой джун, случайно оказавшийся на рабочем месте, знает, где найти инструкцию по починке прода, и знает, как ей пользоваться.

Более того, есть *инструменты*, автоматически случайным образом убивающие сервисы или сетевые соединения, и работающие на продакшене непрерывно — например, Chaos Monkey[4]. Кто-то говорил, что хорошая система должна стабильно работать даже если в дата-центр, где она развёрнута, запускают стаю обезьян, которые хаотично выдёргивают провода и делают нехорошие вещи с серверами, отсюда и название. Непрерывное тестирование отказоустойчивости позволяет системе совершенно спокойно относиться к настоящим отказам.

3.2. Избыточность

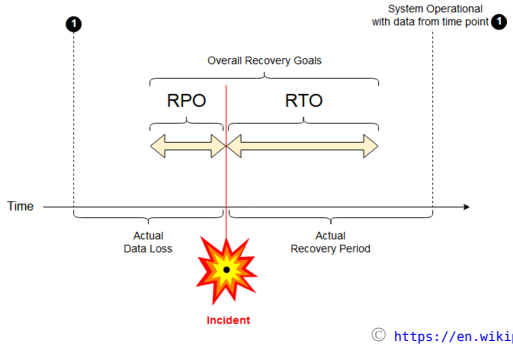
Лучший способ обеспечения отказоустойчивости — это избыточность, потому что если иметь на каждый сервис несколько его копий, при отказе одной остальные продолжат функционировать. Однако избыточность стоит денег, поэтому есть хорошие практики, позволяющие добиваться избыточности эффективно.

Во-первых, надо определиться с тем, что вы хотите от надёжности сервиса. Это чисто бизнес-решение, поскольку оно подразумевает балансировку стоимости эксплуатации и ожидаемую выгоду от надёжности системы. Так что стоит перед началом разработки определить ключевые показатели надёжности:

- Recovery Time Objective — сколько времени должно максимум пройти с момента обнаружения отказа до восстановления системы;
- Recovery Point Objective — данные за какой период до обнаружения отказа можно потерять (например, как часто надо жать на Ctrl-S при программировании, чтобы в случае падения IDE или всей системы страдать не сильно — если раз в день, то потеряете день труда, если раз в две секунды, то две секунды, но клавиатуру испортите);
- Maximum Tolerable Outage — сколько максимум времени бизнес-процесс организации может быть недоступен без значимого ущерба для организации (в отличие от RTO, MTO считает успешным восстановлением ручное исполнение бизнес-процесса).

[4] Инструмент от Netflix, домашняя страница: https://netflix.github.io/chaosmonkey/ (дата обращения: 12.12.2021).

Вот рисунок, иллюстрирующий происходящее:



© https://en.wikipedia.org/wiki/Disaster_recovery

После того, как с целевыми показателями определились, можно заложить в архитектуру механизмы их достижения.

- Балансировщики нагрузки — пожалуй, самый универсальный и надёжный инструмент. Если сервис не имеет своего состояния, запустите два (три, десять) и поставьте перед ними балансировщик нагрузки, который в случае отказа одного экземпляра просто перестаёт посылать на него запросы (впрочем, он может реализовывать более сложную логику типа Circuit Breaker). Балансировка нагрузки ещё и позитивно скажется на скорости работы системы в целом (но негативно на цене).

- Репликация БД — время от времени сохранять копии базы данных (желательно в другую СУБД, готовую мгновенно включиться в работу, но можно и в снапшоты, из которых потом можно восстановить данные). Насколько часто это делать — собственно, определяется RPO. Это абсолютно обязательная практика, так что облачными провайдерами часто делается сама собой.

- Разделение по регионам — ни балансировка нагрузки, ни репликация не поможет, если всё это физически делается в одном здании, и на него упал самолёт. Все крупные и важные системы географически разнесены, что не только повышает надёжность в случае масштабных отказов, но и, опять-таки, позитивно влияет на скорость работы, при правильной настройке DNS (если пользователи автоматически направляются на ближайший к ним сервер). Очень дорого стоит.

- Шардирование — техника сродни репликации, но репликация копирует всю базу, а шардирование равномерно размазывает данные по нескольким разным базам. Это сродни RAID-массиву: репликация работает как RAID 1, то есть просто копирует данные для надёжности, шардирование — как RAID 0, то есть просто распределяет данные с целью прежде всего уменьшить время доступа к ним (операции над разными шардами всегда могут выполняться параллельно). Шардирование, тем не менее, позитивно влияет и на надёжность, поскольку в случае потери одного шарда вы теряете не все данные вообще, а только некоторые. 10% пользователей, заказы которых вы потеряли, лучше, чем 100% (хотя, конечно, тоже не очень, поэтому шардирование и репликация используются совместно — пока один шард восстанавливается из резервной копии, остальные продолжают работать как ни в чём не бывало). Политика

шардирования может быть разной — можно делить записи по регионам пользователей, по первой букве из фамилии (в одной базе только фамилии на А, в другой на Б и т.п.), можно по хеш-функции от чего-нибудь, чтобы более случайно перемешать данные по шардам.

3.3. Минимизация координации

Компоненты распределённых приложений должны совместно работать над решением общей задачи, и если они уж слишком совместно это делают, это может нанести серьёзный ущерб производительности и надёжности системы. Поэтому с необходимостью координации действий сервисов нужно бороться, и, конечно, для этого есть несколько известных приёмов.

Первый — использовать событийный архитектурный стиль для организации взаимодействия между сервисами. Вместо того, чтобы вызывать методы других сервисов, чтобы сообщить им, что у нас что-то произошло (например, зарегистрирован новый пользователь), можно задекларировать событие, на которое все желающие могут подписаться и асинхронно обработать. Тогда источник событий сможет даже не знать, интересно это событие кому-то или нет, или есть ли в системе другие сервисы в принципе. Такие события должны быть связаны с предметной областью, поэтому известны как доменные (domain events). Их обычно рекомендуют использовать для «дополнительных» сценариев (например, добавление пользователя в базу при регистрации выполняется прямым вызовом, а посылка нотификации админу — доменным событием), но бывает так, что вся система строится только на событиях. Есть целые библиотеки, которые поддерживают такую модель, например, MediatR[5] для .NET.

Второй — явно разделять команды и запросы (Command and Query Separation, CQS) и его эволюция, Command and Query Responsibility Segregation, CQRS. Идея в том, что команда должна менять состояние, но ничего не возвращать, а запрос наоборот, ничего не менять, а только возвращать текущее состояние — и это хорошая практика в ООП вообще. CQRS делает наблюдение, что вообще говоря для команд и запросов можно использовать разные схемы БД и даже разные способы их хранения (реляционная для запросов и ООБД для команд, например), и это может в разы повысить эффективность выполнения операций. Особенно с учётом того, что при выполнении запросов не может быть конфликтов между транзакциями, раз запросы ничего не меняют. Кроме того, CQRS предполагает наличие явных доменных команд, которые содержат в себе бизнес-логику, и с которыми взаимодействуют клиенты сервиса. Разумеется, поддержание в актуальном состоянии двух разных баз с разными схемами может быть не очень простой задачей, так что реализовывать этот паттерн надо аккуратно (точнее, использовать семантику Eventual Consistency, о которой чуть дальше).

Сильно помогает, когда данные немутабельны, то есть записали один раз — и всё. Тогда, опять-таки, конфликты при записи невозможны, есть масса возможностей для распараллеливания и эффективного хранения таких данных (вспомните Apache Kafka, она делает именно так). Это использует подход Event Sourcing — идея его в том, что а давайте вообще не будем хранить состояние, а будем хранить только набор событий, которые в него привели. Тогда любой, кому надо, может построить текущее состояние, зная начальное и

[5] Страница MediatR на GitHub: https://github.com/jbogard/MediatR (дата обращения: 12.12.2021).

этот самый набор событий. Для скорости Event Sourcing может использовать read-only-снапшоты с текущим состоянием, которые время от времени (опять Eventual Consistency) обновляются из потока событий. Такой подход очень эффективен, когда событий много, и обработчиков много, и поддерживать между ними согласованное состояние слишком накладно (то есть на самом деле довольно часто, так что Event Sourcing нынче весьма популярен).

Наверное, не надо даже говорить, что все операции, требующие участия нескольких сервисов, должны быть асинхронными — пока запрос выполняется, сервис должен иметь возможность делать какую-то другую работу, а не ждать ответа. Иначе может возникнуть каскад задержек, когда один сервис ждёт второй, второй — третий и четвёртый, и т.д. Ещё на практике очень полезны так называемые *идемпотентные* операции — то есть операции, состояниекоторые могут быть повторены без изменения состояния сервера. Например, все запросы идемпотентны — если они не меняют внутреннее состояние, от случайного повторения запроса ничего не случится. Запросы в духе «включить» или «выключить» тоже идемпотенты, потому что если мы один раз что-то включили, можем вызывать «включить» дальше сколько угодно раз, ничего не изменится. А вот операция «переключить» не идемпотентна. Идемпотентные операции хороши тем, что могут быть безопасно повторены при восстановлении после временной ошибки, и если обработчик упал, другой обработчик может просто взять очередь первого и начать последовательно выполнять операции как ни в чём ни бывало.

Шардирование данных, как, наверное, понятно, также способствует уменьшению координации, поскольку запросы не толкаются вокруг одной БД, а исполняются параллельно и не мешают друг другу.

Кстати, насчёт БД, если их несколько (что бывает почти всегда, если используется микросервисная архитектура, и очень часто в остальных случаях), поддерживать их согласованными обычно очень трудно. Есть понятие «распределённая транзакция», когда хочется добиться атомарности и изолированности операции, включающей в себя несколько независимых сервисов (или независимых БД), они кажутся очень привлекательными для программистов, но их почти никто не умеет. Современная архитектурная мысль говорит, что их следует вообще избегать. Проще, быстрее и, как ни странно, надёжнее просто оптимистично выполнять операции в каждом сервисе отдельно, а если что-то пойдёт не так (например, один из участников вернёт ошибку), выполнить *компенсационную транзакцию*, которая вернёт всё как было. В этом случае опять-таки используется семантика Eventual Consistency — состояние в любой момент времени может быть несогласовано и не все сервисы могут иметь актуальные данные, но в какой-то момент в будущем гарантированно данные будут консистентны.

Это кажется не очень хорошо в плане программирования, потому что мы должны учитывать потенциальную неактуальность данных (прямо как в многопоточном программировании, где lock-free-операции должны учитывать, что данные в кеше каждого ядра могут быть свои и не соответствовать данным в памяти). Однако это суровая правда жизни, как говорит нам CAP-теорема:

В любой распределённой системе можно обеспечить не более двух из трёх свойств:

- *Согласованность данных (Consistency) — во всех вычислительных узлах данные консистентны;*
- *Доступность (Availability) — любой запрос завершается корректно, но без гаран-*

тии, что ответы всех узлов одинаковы;

- *Устойчивость к разделению (Partitioning Tolerance) — потеря связи между узлами не портит корректность.*

Пи этом третий пункт теоремы в распределённых системах должен быть выполнен всегда, в силу принципиальной ненадёжности сети (кстати, в отличие от традиционных СУБД, которые работают на одной машине и абсолютно не устойчивы к разделению, зато гарантируют первые два пункта). Так что мы можем выбрать либо доступность, либо согласованность. Согласованность можно обеспечить, если остановить работу всех узлов, пока они не договорятся об общем состоянии (что само по себе нетривиально при возможности отказов, см., например, задачу византийских генералов[6]), что весьма негативно скажется на скорости работы системы (а следовательно, её доступности — клиенты будут получать отказ в обслуживании). Доступность, однако, сама по себе тоже не очень интересна, потому что если половина серверов банка думает, что у пользователя сто рублей, а другая половина — тысяча, это печально.

На самом деле, эта ситуация известна в теории баз данных, и есть две известные семантики работы с данными: ACID и BASE.

ACID:

- Atomicity — транзакция не применится частично;
- Consistency — завершённая транзакция не нарушает целостности данных;
- Isolation — параллельные транзакции не мешают друг другу;
- Durability — если транзакция завершилась, её данные не потеряются.

BASE:

- Basically Available — отказ узла может привести к некорректному ответу, но только для клиентов, обслуживавшихся узлом;
- Soft-state — состояние может меняться само собой, согласованность между узлами не гарантируется;
- Eventually consistent — гарантируется целостность только в некоторый момент в будущем.

Семантика ACID характерна для централизованных систем, и, поскольку очень удобна в работе, её на заре интернетов пытались перенести и на распределённые приложения, однако CAP-теорема не дала. Поэтому современные распределённые приложения используют более слабую, но всё ещё полезную семантику BASE — сервисы поддерживают целостность только своих данных и асинхронно координируются друг с другом. Собственно, Eventual Consistency, которая постоянно упоминается в этой лекции — это часть семантики BASE.

---

6 https://ru.wikipedia.org/wiki/Задача_византийских_генералов (дата обращения: 12.12.2021)

3.4. Проектирование для обслуживания

Ещё один важный набор приёмов связан с тем, что распределённые приложения довольно сложно контролировать, и не всегда понятно даже, работают они или нет и что такое «работают» вообще (например, три секунды грузится веб-страница — это ок или нет?). Поэтому распределённые приложения должны сразу проектироваться с учётом необходимости управлять их работой и обслуживать их во время выполнения (так называемый принцип Design for operations, основа DevOps).

Самый важный принцип в этом плане — «делать всё наблюдаемым». В частности, обеспечение логирования всего, что происходит в каждом сервисе, и централизованное отображение и анализ логов (то есть подсистема логирования внезапно сама является распределённым приложением). Как пример такой технологии см. «Elastic Stack», включающую в себя такие известные штуки, как Logstash (для сбора логов), Elasticsearch (для индексации и классификации логов) и Kibana (для визуализации состояния системы по логам). В самих реализациях сервисов при этом используются библиотеки, пишущие логи (в правильно место у себя, откуда их потом заберут, или сразу в сетевое хранилище) — log4j/slf4j и его порты и аналоги на других языках (например, log4net).

Помимо логирования есть ещё понятие «трассировка» — это отслеживание того, что происходит с запросом пользователя. Трассировка, как правило, требует отслеживания обработки запроса несколькими сервисами, поэтому требуется поддержка «корреляции» запросов, то есть механизма, позволяющего понять, к обработке чего относится тот или иной вызов. Лог — это как бы горизонтальный срез состояния одного сервиса, как он обрабатывает много запросов, трасса — это как бы вертикальный срез состояния запроса, как его обрабатывают много сервисов. Трассировка позволяет локализовать отказы, идентифицировать узкие места, сетевые задержки и т.п.

На основе логов, трасс и «counter-ов» (то есть метрик производительности каждого конкретного сервиса) должна быть выстроена система *мониторинга*, основывающаяся на численных *метриках*, измеряемых в реальном времени. Примерами метрик могут быть количество обработанных запросов в секунду, количество ошибок в секунду, uptime сервисов и т.д. и т.п. Метрики специфичны для каждого конкретного приложения и определяются в основном бизнес-задачами, хотя есть и более-менее стандартные, которые измеряются оркестраторами (количество запросов, время на ответ, объём принимаемых и передаваемых данных, количество кодов HTTP 5xx в ответах, например). Организация мониторинга и выбор правильных метрик — это в каком-то смысле искусство, но какой-то мониторинг в любом случае необходим.

Чтобы содержательный мониторинг был в принципе возможен, надо договориться о стандартном формате логов и стандартных метриках для приложения, и следить, чтобы стандартов придерживались все сервисы, из которых оно состоит. Для микросервисных приложений это само по себе может быть сложно, потому что сервисов много и они могут быть написаны на разных технологиях. Но поэтому в таких проектах грамотные архитекторы особенно полезны.

Ещё один, кажется, довольно очевидный совет — автоматизировать всё, что может быть автоматизировано, включая развёртывание и мониторинг. Если для запуска приложения требуется четыре часа копировать куда-то файлы, запускать какие-то скрипты и руками лезть в базы, то ошибки неизбежны. В идеале всё, что делается с приложением, должно делаться автоматически одной командой.

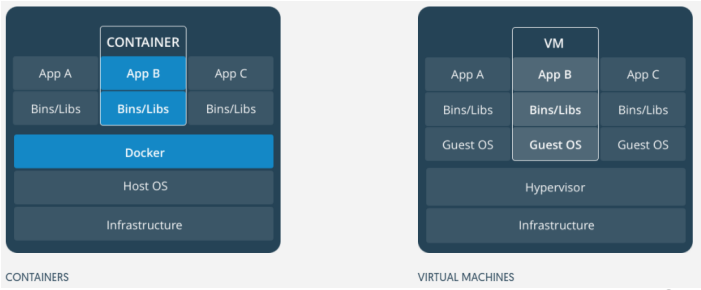
Этого можно добиться, если относиться к конфигурации приложения, как к коду, который можно хранить, версионировать, согласованно редактировать и автоматически применять в рамках обычного CI/CD-процесса. Этому принципу следуют популярные оркестраторы, такие как Docker Compose и Kubernetes (про которые чуть позже) — в конфигурации оркестратора (обычно в виде YAML или JSON-файлов) описывается, какие сервисы в скольки экземплярах на каких портах должны быть запущены, кто раньше, кто позже, у кого какая конфигурация (задаваемая, например, через переменные окружения) и что делать, если кто-то упал. Конфигурация выкладывается в систему контроля версий и применяется одной командой (docker compose up или kubectl apply), лезть в конфигурацию работающей системы руками (например, чтобы остановить или запустить сервис) считается чем-то плохим.

4. Развёртывание

Теперь перейдём к более практическим вещам и поговорим о том, как и куда развёртывать приложение.

4.1. Docker

Концептуально Docker — это легковесная виртуальная машина, которая виртуализирует не машинные команды, как обычные виртуалки, а системные вызовы, то есть используется ядро операционной системы машины-хоста. Что хуже в плане изоляции, чем обычные виртуалки (например, вирусы в Docker-контейнерах запускать может быть плохой идеей), но гораздо быстрее. Ещё Docker-контейнеры отличаются от виртуалок тем, что в них работает один процесс. В принципе, это легко обойти, но концептуально контейнер — это виртуализированный процесс, а не виртуализированная машина:



© https://www.docker.com

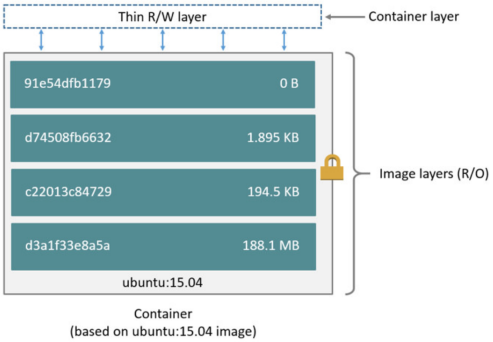
Docker-образы (то есть то, из чего запускаются контейнеры) только для чтения, то есть чтобы хранить в контейнере какие-то данные, надо отобразить его файловую систему на файловую систему хостовой машины. Тем не менее, Docker — это стандарт де-факто по деплою распределённых приложений, потому что позволяет запустить готовое к работе приложение буквально одной командой.

Поскольку Docker используется практически повсеместно, довольно прост в настройке и использовании, и обеспечивает массу преимуществ, крайне рекомендую использовать

его уже сейчас, для своих проектов. Если они связаны с веб — то однозначно, если это что-то консольное — тоже очень желательно (для того, чтобы каждый мог собрать и запустить, без установки правильных версий компилятора и всех библиотек), если с графическим интерфейсом — сложнее, но можно. Под Linux Docker поставить и настроить очень просто, под Windows, возможно, придётся повозиться — если сделать это неправильно, он будет запускать VirtualBox, то есть настоящую виртуалку. Если сделать это правильно, придётся ставить WSL2 (к счастью, в Windows 11 она вроде как уже установлена) и терпеть исчезновение примерно 35 Гб места на диске. И ещё, возможно, включить HyperV в настройках BIOS (который давно уже называется UEFI, но традиции сильны), но это уж как повезёт.

Помимо самого Docker есть ещё Docker Desktop — красивый UI для управления Docker, контейнерами и образами, и Docker Hub — репозиторий для образов, наподобие GitHub и столь же бесплатный (причём, в отличие от Docker Desktop, бесплатный даже для коммерческих применений, хотя и с некоторыми квотами). Поскольку Docker — стандарт де-факто, его знают и умеют с ним работать все нормальные оркестраторы и облачные провайдеры.

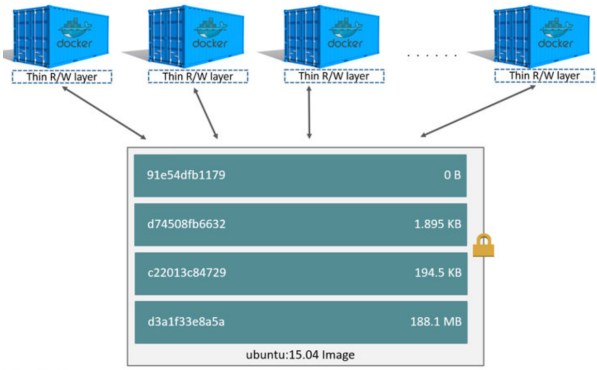
Docker-образ (Docker Image) — это запускабельный образ приложения со всем окружением, необходимым ему для работы (можно понимать как очень навороченный .exe-файл). Образ состоит из слоёв, доступных только для чтения. Например, поверх слоя Alpine Linux лежит слой рантайма ASP.NET, поверх которого слой вашего веб-сервиса, поверх которого лежит слой конфигурации:



Каждый слой имеет свою файловую систему и свои переменные окружения, и результирующая файловая система образа получается просто накладыванием слоёв последовательно один на другой (то есть если в слое A есть file1.txt и file2.txt, а в слое B file2.txt и file3.txt, в результирующем образе будет три файла). Поскольку слои read-only, образы могут разделять слои между собой, как процессы могут разделять динамические библиотеки. Так что, например, если у вас на машине 20 образов поверх Alpine Linux, то слой Alpine Linux у вас ровно один, что очень позитивно сказывается на объёме хранимых данных и потребляемом сетевом трафике (образы скачиваются послойно, так что если вы скачали слой один раз, он больше не качается).

Любой образ может служить базой для создания другого образа. Это, собственно, обычно и делается, когда вы собираете свой образ — поверх всех слоёв существующего образа кладёте один или несколько своих слоёв.

Docker-контейнер (Docker Container) — это запущенный экземпляр образа, типа запущенного .exe-файла:



© https://www.docker.com

У контейнера есть дополнительный слой для записи, который может использоваться файловой системой внутри контейнера для хранения временных данных, но все изменения в нём гибнут при перезапуске контейнера (однако можно сохранить контейнер с его текущим состоянием файловой системы как новый образ). Контейнер содержит один запущенный процесс. Ничто не мешает этому процессу быть, например, bash, но обычно в контейнере работает просто целевое приложение.

Docker Hub[7] — это централизованный репозиторий Docker-образов, куда выкладывают образы все приличные разработчики, включая официальные образы различных дистрибутивов и образы, собранные обычными пользователями. Обычно выкладываемые туда образы публичны, но за небольшие деньги можно получить приватные репозитории плюс доступ к CI/CD для сборки образов (не то чтобы это сильно надо, образы можно собирать любой CI-системой, хоть GitHub Actions, но на Docker Hub может быть гораздо быстрее). В принципе, Docker Hub — это не единственный репозиторий образов, GitHub имеет свой (там образы по умолчанию приватные и их даже не так просто сделать публичными), большие облачные провайдеры имеют свой (Amazon Elastic Container Registry, Azure Container Registry, например), можно поднять свой (из официального Docker-образа, лежащего на Docker Hub). Однако Docker Hub используется по умолчанию (так же, как GitHub — стандарт де-факто для git-репозиториев, хотя есть несколько хороших альтернатив и ничто не мешает поднять свой, даже с красивым графическим интерфейсом — см. GitLab).

4.1.1. Технические детали

Собственно, предположим, что вы установили себе Docker. Что-то поделать с ним можно через Docker Desktop или вашу любимую среду разработки (скорее всего, она много чего умеет), но вообще docker — это консольная утилита (даже две, docker daemon, запускающийся как сервис, и docker, консольный клиент для него). Вот самые основные команды:

- docker run — запускает контейнер. Если такого контейнера нет, делает pull, по умолчанию с Docker Hub. Основные аргументы:

7 https://hub.docker.com/ (дата обращения: 12.12.2021).

  - -d — запустить в фоновом режиме. Без этого ключа docker не вернёт управление, пока контейнер не закончит работу, что может быть хорошо для отладки, но в боевом режиме не нужно;
  - -p host_port:container_port — прокинуть порт из контейнера на хост. Поскольку образы read-only, приложения в них сконфигурированы под некую абстрактную машину так, будто они на ней одни (например, слушают порт 80). Если запускаете два контейнера, каждый из которых слушает порт 80, случилась бы беда, поэтому docker сам симулирует сетевой стек и отображает порты хоста на порты контейнера в момент запуска контейнера. Так что какой порт выделить контейнеру, решает админ хоста, а не автор образа. По умолчанию все порты в контейнере закрыты, так что без ключа -p сетевое приложение запускать просто нет смысла.
  - -i -t — запустить в интерактивном режиме. Если в контенйере есть терминал, можно запустить его в интерактивном режиме, весь ввод с клавиатуры будет передаваться терминалу, а весь вывод — вам в консоль, так что можно работать в контейнере так, будто вы подключились к удалённой машине по SSH. Очень удобно для отладки, но вручную что-то конфигурировать так в контейнере — плохая идея, при перезапуске все изменения пропадут
  - Пример: `docker run -it ubuntu /bin/bash`

- docker ps — показывает запущенные сейчас на хосте контейнеры с их id-шниками, по которым им можно потом посылать команды. Например, `docker run -d nginx; docker ps`

- docker stop — останавливает контейнер (на самом деле шлёт SIGTERM, затем SIGKILL процессу в контейнере — приложение внутри вправе проигнорировать эти сигналы);

- docker exec — запускает дополнительный процесс в уже запущенном контейнере (если он там есть). В контейнеры очень редко ставят полноценный Linux с Bash, потому что они довольно большие, но есть набор утилит BusyBox, который словно бы создан для ручного ковыряния в контейнере — размером он чуть более 2 мегабайт, но реализует все основные утилиты Unix, включая ash (Almquist Shell, легковесный, но не очень функциональный аналог bash). Поэтому если предполагается, что надо будет ходить внутрь контейнера, добавить туда слой с BusyBox может быть хорошей идеей.

4.1.2. Dockerfile

Чтобы собрать свой образ, потребуется Dockerfile — это конфиг сборки контейнера, типа Makefile для Docker. Вот самый простой пример, из документации:

```
# Use an official Python runtime as a parent image
FROM python:2.7-slim

# Set the working directory to /app
```

```
WORKDIR /app

# Copy the current directory contents into the container at /app
ADD . /app

# Install any needed packages specified in requirements.txt
RUN pip install --trusted-host pypi.python.org -r requirements.txt

# Make port 80 available to the world outside this container
EXPOSE 80

# Define environment variable
ENV NAME World

# Run app.py when the container launches
CMD ["python", "app.py"]
```

Команда FROM задаёт, на базе какого образа строится новый образ. Имя образа — это собственно его имя, и *тэг* после двоеточия. Тэг в принципе может быть любой строкой, но обычно используется *semantic versioning* или специальные тэги типа latest.

WORKDIR — это папка в файловой системе контейнера, которая будет рабочей для запускаемого процесса.

ADD рекурсивно копирует содержимое указанной папки на хосте в файловую систему контейнера (тут мы копируем всю папку, где лежит Dockerfile, в папку /app в контейнере — да, прямо в корень файловой системы, всё равно она больше никому, кроме нашего приложения, не будет видна).

RUN исполняет при сборке образа указанную команду. Тут мы менеджером пакетов Python ставим зависимости, которые заранее указали в requirements.txt.

EXPOSE открывает порт в контейнере (открываем порт 80).

ENV определяет переменную окружения, которая будет установлена в контейнере (самый простой способ управлять конфигурацией контенйера, благо переменные окружения можно переопределить при запуске).

Ну и последняя команда — CMD, определяет, что надо запускать при старте контейнера. Тут запускается интерпретатор Python на указанный скрипт (из WORKDIR).

Вот несколько более интересный пример, типичного Dockerfile для типичного ASP.NET-приложения:

```
FROM mcr.microsoft.com/dotnet/aspnet:6.0 AS base
WORKDIR /app
EXPOSE 80
EXPOSE 443

FROM mcr.microsoft.com/dotnet/sdk:6.0 AS build
WORKDIR /src
COPY ["ConferenceRegistration/ConferenceRegistration.csproj", "ConferenceRegistration/"]
RUN dotnet restore "ConferenceRegistration/ConferenceRegistration.csproj"
```

```
COPY . .
WORKDIR "/src/ConferenceRegistration"
RUN dotnet build "ConferenceRegistration.csproj" -c Release -o /app/build

FROM build AS publish
RUN dotnet publish "ConferenceRegistration.csproj" -c Release -o /app/publish

FROM base AS final
WORKDIR /app
COPY --from=publish /app/publish .
ENTRYPOINT ["dotnet", "ConferenceRegistration.dll"]
```

Тут аж четыре команды FROM, что вызывает вопрос, на каком же образе основывается собираемый образ. Дело в том, что FROM сбрасывает текущее состояние образа, но AS позволяет запомнить это состояние как отдельный слой, который потом можно использовать. Итак, тут:

1. Сначала берётся базовый образ с рантаймом ASP.NET, настраивается рабочая папка, открываются порты (HTTP и HTTPS, потому что веб-сервисов, не использующих HTTPS, практически не бывает).

2. Затем в качестве базового выставляется образ с .NET SDK, куда копируется проектный файл и выполняется команда dotnet restore, скачивающая зависимости для проекта.

3. Затем поверх того, что получилось, копируются и остальные исходники, запускается сборка (командой dotnet build).

4. Дальше создаём новый слой поверх результатов сборки, выполняем dotnet publish в нём, получая рабочее приложение со всеми зависимостями, сложенными в одну папку (наподобие make install).

5. Дальше сбрасываем всё, возвращаясь к самому первому слою, и копируем из слоя publish собранное приложение в рабочую папку. В итоге получаем образ, в котором только рантайм ASP.NET (без всякого SDK) и собранное приложение с нужными ему библиотеками, никаких исходников или промежуточных файлов сборки.

6. Дальше устанавливаем точку входа — какой процесс будет запускаться (почти то же, что CMD, но CMD запускает шелл и передаёт ему указанные аргументы, и если а ENTRYPOINT — сразу запускает процесс).

Это называется «двухфазная сборка» (точнее, «двухступенчатая»), и это рекомендованная практика для сборки приложений на компилируемых языках. В принципе, нам ничего не мешает собрать приложение на хостовой машине и потом сложить в образ уже скомпилированные бинарники, но тогда на хосте надо будет иметь средства разработки, и если выйдет новая версия компилятора, которому не понравится наш код, то печаль. При сборке в самом образе инструментарий будет всегда именно таким, какой мы заказывали, он не будет зависеть от инструментов и окружения хостовой машины, вплоть до того, что

такой образ можно собрать, имея только исходники и docker — не надо не только иметь .NET SDK, но даже знать, что это такое. Работает как магия[8].

4.2. Docker Compose

Если у нас один контейнер, всё понятно. Но распределённые приложения на то и распределённые, что контейнер там не один. Можно было бы руками запускать все контейнеры через docker run, следить, что никто из них не упал, и настраивать каждому конфигурацию (например, видимо, порты надо будет как-то передавать всем запущенным контейнерам), и это может очень быстро надоесть. На помощь приходят *оркестраторы*, один из которых, Docker Compose, поставляется прямо вместе с Docker. Вот пример конфигурации многоконтейнерного приложения, описываемого в файле docker-compose.yml:

```
version: "3"
services:
    web:
        image: username/repo:tag
        deploy:
            replicas: 5
            resources:
                limits:
                    cpus: "0.1"
                    memory: 50M
            restart_policy:
                condition: on-failure
        ports:
            - "80:80"
        networks:
            - webnet
networks:
    webnet:
```

Тут говорится, что у нас есть виртуальная сеть с именем webnet, и каждый контейнер работает как бы на отдельной машине внутри сети (разные образы имеют разные доменные имена, а реплики одного образа автоматически попадают за балансировщик нагрузки). Тут пример простой, поэтому образ всего один (username/repo:tag), но запускаемый в пяти экземплярах. Также для каждого экземпляра устанавливается лимит на ресурсы, в доле загруженности процессора хоста и максимального объёма оперативной памяти. restart_policy тут говорит, что если контейнер вышел с ненулевым кодом возврата, его надо перезапустить. Порты 80 всех реплик прокидываются через балансировщик нагрузки на порт 80 хостовой машины.

Вот несколько более сложный, но более реальный пример, из одного из кафедральных студпроектов:

---

[8] На самом деле на этой магии основана практика контейнеризации рабочего места программиста, см. Docker Development Environments.

```yaml
services:
  web:
    container_name: web
    image: example/web-part:latest
    ports:
      - "5000:5000"
    depends_on:
      - gateway
    deploy:
      resources:
        limits:
          memory: 50M
        reservations:
          memory: 20M
    networks:
      - network-services
  gateway:
    container_name: gateway
    image: docker.pkg.github.com/example-gateway:master
    ports:
      - "8000:80"
    depends_on:
      - repo
      - auth
    networks:
      - network-services
  auth:
    container_name: auth
    image: docker.pkg.github.com/example-auth:master
    ports:
      - "8002:80"
    volumes:
      - type: bind
        source: ./Auth/users.db
        target: /users.db
    networks:
      - network-services
  repo:
    container_name: repo
    image: docker.pkg.github.com/example-repo:master
    ports:
      - "8004:80"
    networks:
      - network-services
networks:
  network-services:
```

```
    driver: bridge
```

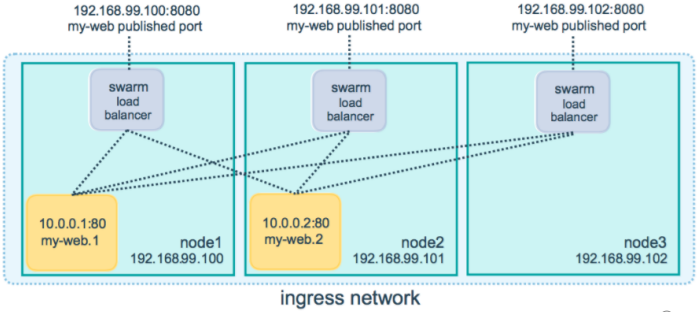
4.2.1. Docker Swarm

Запускать через Docker Compose несколько контейнеров на одной машине может быть полезно, но это не очень масштабируемо, и теряются все преимущества распределённости. Поэтому Docker (опять-таки прямо из коробки) поддерживает организацию вычислительного кластера, с помощью Docker Swarm.

Инициализировать кластер можно командой docker swarm init –advertise-addr <MANAGER-IP>, выполненной на машине, которая будет *менеджером* swarm-а. Эта команда вернёт токен, который потом можно будет использовать для подключения других машин к swarm-у, например:

```
docker swarm join \
    --token  SWMTKN-1-49nj1cmql0jkz5s954yi3oex3nedyz0fb0xx14ie39trti4wxv-8vxv8rssmk743ojnwacrr2
    192.168.99.100:2377
```

docker swarm join может быть выполнена на нескольких машинах, они скоординируются с менеджером и будут готовы принимать себе контейнеры, запущенные через Docker Compose. При этом на каждой машине будет автоматически запущен балансировщик нагрузки, так что обращение к порту на одной машине из swarm-а может быть перенаправлено на любую другую:



Docker Compose + Docker Swarm может использоваться для организации вполне себе настоящей системы распределённых вычислений, и даже довольно производительной, чего может быть вполне достаточно для многих корпоративных информационных систем, хостящихся на серверах компании.

4.3. Kubernetes

Для больших высоконагруженных систем с высокими требованиями к надёжности Docker Compose обычно не используется, поскольку он сам по себе относительно мало чего умеет и не очень конфигурируем. Для серьёзных задач применяют несколько более продвинутый оркестратор — Kubernetes.

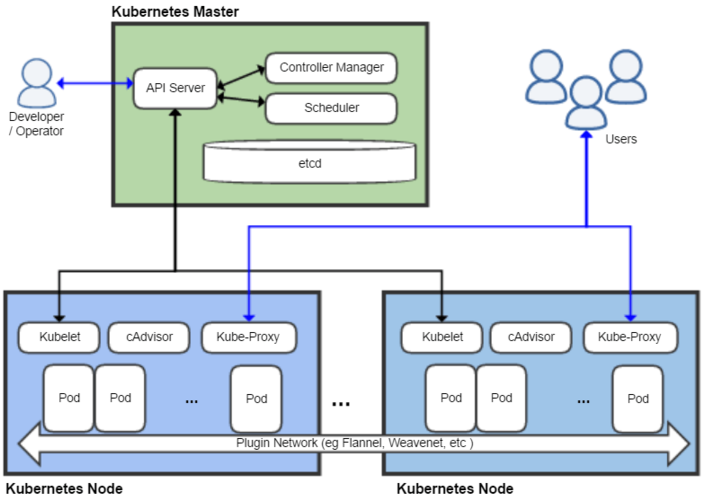
В принципе, задачи у него такие же, как у Docker Compose с Docker Swarm — имея некоторое количество Docker-контейнеров и некоторое количество машин (физических

или виртуальных) в кластере, раскидать контейнеры по машинам, управлять взаимодействием контейнеров, балансировать нагрузку, следить за их временем жизни, запускать/останавливать реплики при необходимости. Kubernetes в разы сложнее в конфигурировании, так что с ним часто используются дополнительные инструменты, упрощающие задачу написания конфигурационных файлов — это не один docker-compose.yml написать. Однако в разы функциональнее и умнее, поэтому Kubernetes сейчас — стандарт де-факто для развёртывания больших приложений.

Интересно, что Docker Desktop имеет встроенную поддержку Kubernetes, так что если у вас есть Docker Desktop, у вас уже есть Kubernetes-кластер из мастер-узла и одного вычислительного узла, который бесполезен для реального развёртывания, но вполне годится для тестирования.

Kubernetes появился в Google из их внутреннего проекта Borg, создававшегося для оркестрации приложений Google. Он с открытым исходным кодом и, раз уж это проект от Google, написан на Go. Причём, Google рекомендует и микросервисы стараться писать на Go, в том числе потому, что типичный размер контейнера с Go-приложением (полного, со всеми слоями) — порядка шести мегабайт. В отличие от, например, ASP.NET, который, если очень постараться, можно запихать мегабайт в 80. При частых деплоях и огромных кластерах в десятки тысяч машин разница в плане сетевого трафика может быть очень ощутимой.

Архитектурно Kubernetes устроен как довольно обычное распределённое приложение-оркестратор (аналогично Apache Hadoop, например, архитектуру которого показывали в самой первой лекции этого курса). Есть *master*, предоставляющий интерфейс для управления кластером и координирующий действия *node*-ов:



© https://ru.wikipedia.org/wiki/Kubernetes

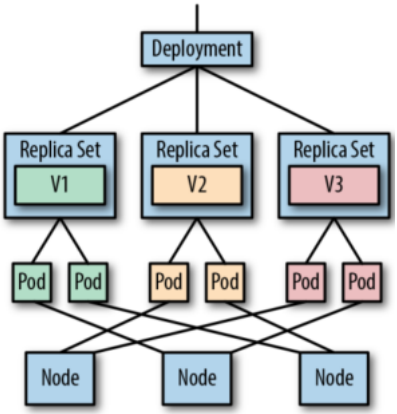
Master имеет базу данных конфигурации etcd, где собственно и хранится вся текущая конфигурация системы. Controller Manager отвечает за коммуникацию с облачным провайдером, на котором запущен Kubernetes-кластер, если таковой есть, чтобы использовать

его ресурсы типа балансировщиков нагрузки. Scheduler отвечает за раскидывание контейнеров по узлам. Мастер в реальной жизни реплицирован и синхронизируется со всеми репликами, так что в случае отказа одного узла-мастера ничего страшного не случится. Более того, при отказе всех узлов-мастеров приложение, скорее всего, продолжит работать как ни в чём ни бывало.

На каждом из узлов кластера запущены:

- Kubelet — это штука, которая принимает команды от scheduler-а, запускает контейнеры на узле и следит за их статусом;
- Kube-Proxy — компонент, отвечающий за сетевую магию внутри кластера — маршрутизацию запросов, обработку запросов извне;
- cAdvisor — вообще говоря, не обязателен, это монитор ресурсов, собирает метрики работы контейнера;
- Pod — набор Docker-контейнеров, которые должны работать вместе (например, вебсервис и его база данных), единица развёртывания в Kubernetes.

Конфигурация Kubenetes состоит из *объектов* разных типов, данные о которых хранятся в etcd и попадают туда при применении yaml-файлов с описанием объектов (ну, не обязательно yaml, но суть такая). Вот базовые типы объектов (и структура типичного кластера):



© J. Arundel, J. Domingus, Cloud Native DevOps with Kubernetes

- Deployment — это описание деплоя одного сервиса (на самом деле, одного Pod-а, то есть по сути группы сервисов). Он управляет запуском контейнеров, репликацией и выкатыванием новых версий. Deployment при создании автоматически создаёт объекты ReplicaSet.
- ReplicaSet отвечает за реплицированные группы Pod-ов, запуская и перезапуская их при необходимости.

- Pod, как уже говорилось, это набор Docker-контейнеров, работающих вместе, а его описание — это конфигурация запущенных контейнеров (то, что указывается обычно в docker run — образ, прокидывание портов, переменные окружения, монтирование папок файловой системы хоста).

Вот пример описания простого Deployment-а (манифест):

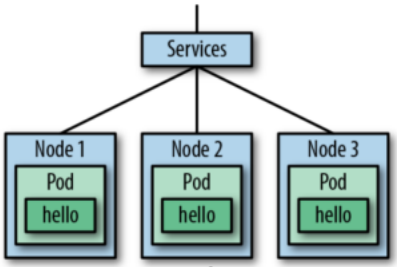
```
apiVersion: apps/v1
kind: Deployment
metadata:
    name: demo
    labels:
        app: demo
spec:
    replicas: 1
    selector:
        matchLabels:
            app: demo
    template:
        metadata:
            labels:
                app: demo
    spec:
        containers:
        - name: demo
            image: cloudnatived/demo:hello
            ports:
            - containerPort: 8888
```

© J. Arundel, J. Domingus, Cloud Native DevOps with Kubernetes

Тут довольно много всего написано (поэтому для написания таких штук часто используются дополнительные тулы), суть — в image (образ, который надо запустить) и желаемом количестве реплик (тут одна). Ещё тут активно используется система *меток* — это просто текстовые строки, которые позволяют проводить выборку нужных ресурсов (например, можно пометить свои ресурсы метками production и test, и применять команды только к ресурсам с указанной меткой).

При выполнении команды kubectl apply -f <имя файла или папки с манифестами> Kubernetes обновит желаемую конфигурацию в etcd, посчитает разницу между текущей и желаемой конфигурацией, и выполнит операции, переводящие текущую конфигурацию в желаемую.

Однако так работать ничего не будет, потому что тут написано, что деплоймент имеет порт 8888, открытый внутри контейнера, но снаружи его не видно. Чтобы было видно, нам потребуется описать ещё один ресурс — Service. Это прокси и балансировщик нагрузки, который имеет фиксированный ip-адрес и перенаправляет запрос кому-нибудь из реплик:



© J. Arundel, J. Domingus, Cloud Native DevOps with Kubernetes

Помимо Service, есть ещё ресурс Ingress, позволяющий более умно маршрутизировать трафик и работать с TLS-сертификатами.

Вот пример описания сервиса:

```
apiVersion: v1
kind: Service
metadata:
  name: demo
  labels:
    app: demo
spec:
  ports:
  - port: 9999
    protocol: TCP
    targetPort: 8888
  selector:
    app: demo
    type: ClusterIP
```

Этот сервис перенаправляет запросы с порта 9999 хоста на порт 8888 контейнера, а точнее, всех контейнеров с меткой «demo» (что указывается в параметре selector).

Теперь, когда у нас есть два манифеста, можно это всё запустить, командами

```
kubectl apply -f k8s/deployment.yaml
kubectl apply -f k8s/service.yaml
kubectl port-forward service/demo 9999:8888
```

Полный пример из книги J. Arundel, J. Domingus, Cloud Native DevOps with Kubernetes можно посмотреть у них на GitHub: https://github.com/cloudnativedevops/demo/tree/main/hello-k8s (дата обращения: 13.12.2021). Причём, можно и запустить — оно само скачает нужный контейнер с Docker Hub.

4.3.1. Использование Kubernetes

Первая и главная рекомендация по использованию Kubernetes — читайте документацию. Про это дело пишут книги (и не одну), так что в маленьком подразделе одной лекции пользоваться Kubernetes не научить (разве что как извращённым способом сделать docker run, как выше).

Вторая важная рекомендация — относитесь к конфигурации развёртывания как к коду. kubectl и некоторые другие инструменты умеют писать прямо в etcd, и можно вручную управлять состоянием кластера, вручную меняя количество реплик, порты, ресурсы. А потом в какой-то момент всё упадёт (или вы решите сменить облачного провайдера), вы перезапустите кластер — и ваша система вообще не работает, потому что вы навносили вручную каких-то изменений и забыли, а сохранённая конфигурация теперь вообще нежизнеспособна. Надо сразу приучаться вносить изменения только декларативно — пишете/правите манифест, коммитите его в систему контроля версий, применяете (или его за вас применяет CI-система). Так у вас будет всегда актуальный конфиг, и всегда по истории коммитов можно будет найти того несчастного, кто всё сломал, и уволить[9].

4.3.2. Контроль состояния контейнера

Это уже говорилось выше, но для реальных приложений критичен мониторинг. Kubernetes умеет в этом плане довольно многое — интеграция с cAdvisor, например. Но есть ещё важная штука, которую надо писать руками: livenessProbe. Покажем на примере:

```
livenessProbe:
  httpGet:
    path: /healthz
    port: 8888
  initialDelaySeconds: 3
    periodSeconds: 3
```

Это часть манифеста Pod или Deployment, в которой написано, что Kubelet, чтобы проверить, жив ли контейнер, должен сделать GET-запрос на URL <ip контейнера>/healthz на порт 8888, и если он ответит с кодом 200, то контейнер жив. Тут также написано, что делать это надо через три секунды после запуска контейнера (чтобы дать ему запуститься) каждые три секунды. Это позволяет детектить ситуации, когда контейнер не упал, но по тем или иным причинам не может исполнять запросы (например, заделочился).

Есть ещё readinessProbe, устроенная аналогично, но имеющая другую семантику — что контейнер готов обрабатывать запросы. Если livenessProbe неудачна, контейнер перезапустят, если readinessProbe неудачна, просто не будут направлять ему запросы из Service, а дадут приготовиться к работе.

4.3.3. Стратегии обновления

Ещё в реальной жизни важно обеспечить плавное и аккуратное переключение на новую версию приложения при его обновлении. Для этого есть разные стратегии, самая популярная — Blue/green deployment. Вместо того, чтобы убить старые контейнеры и запустить новые, создаётся новый набор Deployment-ов, куда выкатывается новая версия, контейнеры внутри инициализируются и готовятся к работе, мы, возможно, вручную тестируем, что всё ок, и переключаем трафик (с помощью Service или Ingress) на них. Делается это через систему меток: добавляем в манифест Service в selector метку deployment: blue, а когда

[9] Это основной постулат «Культуры DevOps», о которой в интернете так много общих слов и бессвязных рассуждений — *во всём виноват программист, бейте его*.

закончим развёртывание второй версии (все ресурсы которой помечены как deployment: green), меняем селектор в Service и применяем его. Дальше по мере окончания работы клиентов с контейнерами в blue-деплойменте можно постепенно отключать контейнеры, пока не останется только green-деплоймент. Либо, если релиз неудачный, одной командой переключиться обратно на старую версию. При релизе следующей версии происходит то же самое, но blue и green меняются местами.

Иногда бывает так, что контейнеры выполняют длительные задачи и деплои происходят чаще, чем одна задача успевает досчитаться (или контейнеры обслуживают длительные подключения, например, через веб-сокеты). Тогда Blue/green deployment обобщается до «rainbow deployment» — когда запущено сразу несколько версий приложения и старые версии постепенно, по мере окончания работы с ними клиентов, выводятся из работы.

А ещё есть Canary deployment — это когда на новую версию заворачивается некоторый небольшой процент трафика, который постепенно увеличивается, пока не станет 100%, и тогда старая версия выключается. Это делается для того, чтобы небольшой процент пользователей попробовал новую версию, и если всё плохо и всё упало, то, во-первых, мы бы об этом тут же узнали от средств мониторинга, и во-вторых, пострадал бы только небольшой процент пользователей. Для этого есть даже специальные инструменты, например Istio — они же, и такая же по сути практика, может использоваться и для A/B-тестирования, о котором наверняка было в курсе по программной инженерии.

Ещё хороший совет — никогда не используйте тэг latest у Docker-образов, всегда фиксируйте конкретную версию. latest может продвигаться, так что ваша система может меняться незаметно для вас, а если вы используете latest на сторонние образы, вы вообще отдаёте своё приложение на милость сторонним разработчикам, которые могут одной командой всё сломать.

4.3.4. Дополнительные инструменты

Писать манифесты вручную может быть тяжело, а вручную с помощью kubectl следить за состоянием кластера, собирать логи и т.п. может быть вообще невозможно. Поэтому Kubernetes обычно используется с набором инструментов, некоторые из которых независимы, некоторые выросли поверх Kubernetes и используются только для него. Вот некоторые примеры:

- Helm — «пакетный менеджер» для Kubernetes, серьёзно упрощающий конфигурирование сторонних приложений внутри вашего кластера. Он же может использоваться как шаблонный генератор манифестов. Управление «пакетами» Helm выполняет с помощью Helm Charts — это шаблон манифестов Kubernetes плюс конфигурационный файл, куда вынесены изменяемые параметры конфигурации, типа портов или меток, которые вставляются в шаблоны манифестов. Пишем Helm Chart один раз, потом применяем сколько угодно раз, просто меняя конфигурационный файл, а не обновляя сотню .yaml-файлов с манифестами ресурсов Kubernetes.

- Kubernetes Dashboard — веб-интерфейс, отображающий статус кластера. Частая ошибка новичков — делать его доступным без авторизации, несмотря на то, что Kubernetes Dashboard с радостью расскажет все коммерческие тайны и даже секреты, используемые в кластере (логины-пароли, токены и т.д.). Но будучи должным образом защищённым, Kubernetes Dashboard очень удобен для быстрого мониторинга.

- Prometheus — стандарт де-факто для мониторинга и нотификаций, более серьёзная штука, чем Kubernetes Dashboard.
- Clair — сканер контейнеров, статически (то есть без запуска) проверяет их на часто встречающиеся уязвимости. В реальной жизни стоит всегда прогонять Clair или что-то такое на контейнерах, деплоящихся в кластер, чтобы вас не сломали.
- Velero — инструмент для бэкапа состояния кластера (в частности, делать бэкап etcd).

4.3.5. Стратегии мониторинга

Помимо инструментов для сбора метрик, важно также определиться с самими метриками. выше говорилось, что это некоторое искусство, однако есть типовые паттерны:

- Requests-Errors-Duration (RED) — число входящих запросов, число ошибок и продолжительность выполнения каждого запроса.
- Utilization-Saturation-Errors (USE) — использование аппаратных ресурсов (процессора, памяти, диска), длина буфера входящих запросов, ждущих обработки, число ошибок.

RED больше про внешнее поведение сервиса, USE больше про его внутреннее состояние. Поэтому RED полезен как показатель общего здоровья и использования системы, USE позволяет понять, насколько эффективно приложение использует выделенные ему мощности (что может помочь оптимизировать стоимость аренды ресурсов).

4.4. Облачная инфраструктура

Из всего вышесказанного может сложиться впечатление, что чтобы содержать распределённое приложение, вам потребуется купить высокопроизводительный кластер или суперкомпьютер, или, если приложение маленькое, поставить дома/в офисе в угол какой-нибудь ненужный ноут, пробросить на него порты и запустить там узел Kubernetes. Это впечатление неправильное. Практика показывает, что самим содержать вычислительные ресурсы для работы большого приложения может быть гораздо накладнее, чем само приложение. А если приложение маленькое и работает на ноуте в углу, то, скорее всего, не защищено от выключения электричества, пропажи интернет-соединения или порчи жёсткого диска. В любом случае это плохая идея, и лучше уж разориться на аренду облачных ресурсов у компаний, которые на этом специализируются, и предоставляют по заказу высокопроизводительную и надёжную инфраструктуру.

Единственное, что предоставляют они уж очень много чего, и если вы решите пойти, например, на сайт AWS с мыслью арендовать небольшую машину, где можно было бы запустить Docker-контейнер с вашим веб-приложением, вы можете сойти с ума (хотя бы от сотни разных трёхбуквенных аббревиатур на главной странице). Вообще, облачные сервисы делятся на три крупные категории:

- Infrastructure as a Service — когда облачный провайдер предоставляет вам виртуальную машину, дисковое пространство и некоторое количество сетевого трафика,

дальше делайте что хотите. Например, ставите на виртуалку Docker, настраиваете на нескольких виртуалках Kubernetes-кластер и т.д.

- Platform as a Service — когда облачный провайдер предоставляет набор уже готовых сервисов, которые вы можете использовать, например, Kubernetes-кластер, который вы инструментами облачного провайдера конфигурируете и запускаете на нём свои контейнеры, даже не зная, на какой операционной системе они там работают. Обычно дешевле и быстрее в настройке, чем IaaS, но если вы знаете, что делаете. Если не знаете, количество опций типа балансировщиков нагрузок, хранилищ данных и т.п. может вогнать в депрессию.

- Software as a Service — когда облачный провайдер предоставляет уже готовое приложение (например Google Docs или облачные IDEшки).

В принципе, разные виды сервисов можно смешивать в каких угодно пропорциях, собирая инфраструктуру под своё приложение. Полноценные виртуальные машины могут использовать уже преднастроенные облачным провайдером сервера СУБД и общаться с Docker-контейнерами, развёрнутыми в PaaS-стиле.

Вот наиболее популярные облачные провайдеры. Они все имеют более-менее одно и то же, все в том или ином виде предоставляя возможности по запуску приложений, поддержку оркестрации (Kubernetes или Docker Compose только недавно начали своё победное шествие, многие провайдеры всё ещё имеют свои проприетарные оркестраторы, типа Heroku — нестандартно, зато очень удобно).

- Amazon Web Services — мировой лидер в облачной инфраструктуре, ему принадлежит почти 50% рынка (хотя на этом рынке очень большая конкуренция, потому что кто владеет облачной инфраструктурой, тот владеет миром). Инфраструктура Amazon географически разнесена и весьма надёжна — они гордятся тем, что система будет работать даже при одновременном подрыве более 30 ядерных боеголовок.

- Microsoft Azure — то же самое от Microsoft, популярна в основном потому, что хорошо интегрирована с инструментами разработки от Microsoft. Некоторое время была недоступна в России (из-за санкций?), но сейчас (на декабрь 2021 года) всё работает.

- Google Cloud — в Google разработали Kubernetes, поэтому Google Kubernetes Engine (часть Google Cloud) — старейший и наиболее зрелый провайдер для кластеров Kubernetes. Больше ничем особо не примечателен (разве что Google Colab — позволяет погонять свой ненужный ML на настоящих дорогих видеокартах бесплатно для студентов).

- Всё остальное, среди которого стоит, наверное, отметить Yandex.Cloud — по российскому закону о персональных данных их надо хранить на территории России, а крупные облачные провайдеры в России дата-центров всё ещё не имеют. Yandex.Cloud got you covered. Ну и, наверное, заслуживает упоминания Heroku, как очень дружественная к новичкам платформа.

4.4.1. Экосистема AWS

В качестве примера типичного облачного провайдера рассмотрим Amazon Web Services. Вот что он умеет (в частности — так-то он умеет ещё сотни всего):

- Вычисления:
  - EC2 (Elastic Compute Cloud) — аренда виртуалок.
  - ECS (Elastic Container Service) — среда для запуска Docker-контейнеров, интегрированная с Amazon Elastic Container Registry (типа Docker Hub, но на Amazon). Свой оркестратор.
- Сеть:
  - VPC (Virtual Private Cloud) — конфигурируемая виртуальная сеть, с настройками подсетей, разделением по регионам и т.п.
  - ELB (Elastic Load Balancing) — продвинутый балансировщик нагрузки.
  - API Gateway — ну, API Gateway, как в описании микросервисного стиля.
- Устройства хранения:
  - EFS (Elastic File System) — распределённая масштабируемая файловая система, монтируется в виртуалку или контейнер как фактически ещё один диск.
  - EBS (Elastic Block Store) — фактически, облачный жёсткий диск.
- SaaS, базы данных:
  - RDS (Relational Database Service) — предустановленные сервера СУБД (внутри может быть много чего, от MariaDB до Oracle).
  - DynamoDB — облачная NoSQL-база от Amazon.
  - OpenSearch Service — поисковый движок и анализатор слабоструктурированных и неструктурированных данных (в т.ч. логов, часть Elastic Stack).

4.4.2. Инфраструктура как код

Теперь понятно, что вручную сидеть и прокликивать сотни окошек в Amazon Web Services, деплоя пятьдесят разных сервисов и «обвязку» к ним может быть очень хлопотно, а если мы вдруг захотим перейти на Azure, то для большого приложения проще сразу самоубиться. Поэтому все нормальные облачные провайдеры поддерживают веб-API для конфигурирования инфраструктуры, и этим пользуется подход Infrastructure as Code. Kubernetes использует подход «Конфигурация развёртывания как код», описывая в манифестах развёртывание контейнеров на уже готовой инфраструктуре, подход IaC идёт дальше и предлагает описывать как код саму инфраструктуру:

«The enabling idea of infrastructure as a code is that systems and devices which are used to run software can be treated as if they, themselves, are software» (Infrastructure as Code, Kief Morris)

Модель требуемой инфраструктуры описывается независимым от облачного провайдера образом (в духе «надо кластер Kubernetes с пятью узлами, балансировщик нагрузки

и сервер NoSQL-СУБД»), коммитится в систему контроля версий и применяется относительно выбранного облачного провайдера (и тогда кластер Kubernetes конфигурируется из имеющихся у провайдера ресурсов). Это позволяет, во-первых, иметь воспроизводимое развёртывание (в идеале, с почти нуля — вам всё-таки потребуется завести аккаунт и привязать банковскую карту), во-вторых, перейти на другого облачного провайдера одной командой (в идеале).

Пример такого инструмента — Terraform. Поддерживает что-то около 135 облачных провайдеров, имеет консольный интерфейс, который позволяет залогиниться в выбранный облачный провайдер (например, Microsoft Azure) и применить желаемую конфигурацию. Например, вот конфигурация Kubernetes-кластера для Azure (из туториала https://learn.hashicorp.com/tutorials/terraform/aks?in=terraform/kubernetes):

```
resource "azurerm_kubernetes_cluster" "default" {
    name                = "${random_pet.prefix.id}-aks"
    location            = azurerm_resource_group.default.location
    resource_group_name = azurerm_resource_group.default.name
    dns_prefix          = "${random_pet.prefix.id}-k8s"

    default_node_pool {
        name            = "default"
        node_count      = 2
        vm_size         = "Standard_D2_v2"
        os_disk_size_gb = 30
    }

    service_principal {
        client_id     = var.appId
        client_secret = var.password
    }

    role_based_access_control {
        enabled = true
    }

    tags = {
        environment = "Demo"
    }
}
```

Специфика конкретного провайдера, увы, необходима — например, предоставляемые ресурсы называются у разных провайдеров по-разному, но подредактировать один файл всё равно проще, чем копаться в GUI облачных провайдеров вручную.