



## ICON-In-the-Cloud (ICONIC)

Апробирование численного прогнозирования погоды  
на коммерческих облачных сервисах для Центральной Азии

Сентябрь 2022

©2022 The World Bank Group  
1818 H Street NW  
Washington D.C. 20433, USA  
Internet: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)

## Отказ от ответственности

Данная публикация является результатом работы сотрудников Всемирного банка, выполненной при внешнем содействии. Заключение, толкования и выводы, изложенные в этой работе, не обязательно отражают точку зрения Всемирного банка, его Совета исполнительных директоров или правительств, которые они представляют.

Всемирный банк не гарантирует точность данных, включенных в эту работу. Границы, цвета, названия и прочие данные, представленные в этой публикации, не подразумевают какого-либо суждения со стороны Всемирного банка относительно правового статуса какой-либо территории или одобрения или принятия таких границ.

Эта публикация подготовлена при финансовой поддержке Европейского Союза. Его содержание является исключительной ответственностью авторов и не обязательно отражает точку зрения Европейского Союза.

## Финансирование

Пилотирование ICONIC в Центральной Азии, включая подготовку этого отчета и обучение специалистов из Центральной Азии, финансировалось Центральноазиатской программой водных и энергетических ресурсов (CAWER), Программой установления связей и торговли в Азии (РАСТ), Глобальным фондом по уменьшению опасности стихийных бедствий и восстановлению (GFDRR), Консорциумом COSMO и Deutscher Wetterdienst (DWD). Авторы благодарны всем организациям, поддержавшим эту работу.

# Выражение признательности

**Данный отчет был подготовлен многосторонней группой партнеров, в состав которой вошли:**

Всемирный банк

**Дэниел Кулл**, старший специалист по управлению рисками бедствий, руководитель рабочей группы

**Д-р Жак Амбюль**, старший эксперт-метеоролог

Deutscher Wetterdienst (DWD)

*Исследования и разработки в области бизнеса*

**Доктор технических наук, профессор Роланд Потхаст**, директор Департамента метеорологического анализа и моделирования

**Д-р Гюнтер Цангл**, руководитель отдела численных моделей

**Д-р Флориан Прилл**, отдел цифровых моделей

**Д-р Джулия Келлер**, отдел планирования и координации

*Техническая инфраструктура и операции бизнес-направления*

**Кристиан Эсер**, отдел поддержки компьютерных систем

Всемирная метеорологическая организация (ВМО)

**Фатих Кая**, эксперт по проектам, Отдел гидрологического прогнозирования и водных ресурсов

Инновационные водные и экологические решения (IWES)

**Д-р Аброр Гафуров**, старший эксперт по гидрологии

Верстка и дизайн отчета: **Владимир Мирзоев**.

# Содержание

Отказ от ответственности .....	2
Финансирование .....	2
Выражение признательности .....	3
Краткое содержание .....	5
Сокращения .....	8
1. Численное прогнозирование погоды и вычисления .....	9
2. Партнерство в Центральной Азии .....	12
3. Домен и конфигурация модели .....	14
4. Тестирование .....	15
5. Опыт и результаты .....	16
5.1. Настройка модели .....	16
5.2. Оптимизация облачных сервисов .....	16
5.3. Время прогнозирования .....	17
5.4. Портируемость .....	18
5.5. Расходы .....	18
6. Выводы .....	21
6.1. Эффективность затрат .....	21
6.2. Требования к подключению к Интернету и обеспечению безопасности .....	23
6.3. Требования к штатному ИКТ-персоналу .....	23
6.4. Гибкость .....	24
6.5. Зависимость от глобального поставщика ЧПП .....	24
Приложение: Настройка ICONIC .....	25

# Краткое содержание

Численный прогноз погоды (ЧПП) с высоким разрешением имеет решающее значение для улучшения прогнозирования ожидаемых метеорологических условий, особенно экстремальных явлений. Он предоставляет пространственную и временную информацию с высоким разрешением о потенциально интенсивных осадках, ветре, температуре и других атмосферных явлениях, которые могут помочь лучшему прогнозированию надвигающихся опасных природных явлений. Принимая во внимание изменение климата и связанное с ним возрастание частоты и масштабов опасных природных явлений, не следует недооценивать значение ЧПП для оперативной работы, информирования и услуг по уведомлению об опасных погодных явлениях национальных метеорологических и гидрологических служб (НМГС). Постоянно повышающаяся точность современного прогнозирования погоды была бы невозможна без ЧПП.

НМГС традиционно устанавливают в своих помещениях высокопроизводительные компьютеры (ВПК) для запуска моделей ЧПП. Это дает определенные преимущества, такие как минимизация потенциальных задержек (отставаний во времени) в сети и узлах, оптимальная конфигурация оборудования для нужд ЧПП и надежная защита данных. Однако из-за нехватки ресурсов и мощностей многие НМГС часто испытывают трудности с эксплуатацией и обслуживанием ВПК, что требует дорогостоящих инвестиций в оборудование и инфраструктуру, а также значительных регулярных бюджетов на техническое обслуживание, электроснабжение, охлаждение и квалифицированный персонал. Кроме того, операционные ограничения ВПК могут привести к периодам недоиспользования и чрезмерного использования, что приводит к неоптимизированным операциям и снижению экономической эффективности.

И наоборот, облачные вычисления становятся все более доступными и предлагают большую гибкость в масштабировании рабочих мест и вычислительных ресурсов, не требуя значительных капиталовложений. Таким образом, заключение контрактов с провайдерами (поставщиками) облачных вычислений для удовлетворения вычислительных потребностей может оказаться привлекательным, особенно для НМГС с ограниченными ресурсами, намеревающихся использовать модели ЧПП для ограниченной территории (LAM) для поддержки своего оперативного прогнозирования.

Немецкая метеорологическая служба (DWD), Всемирный банк и Всемирная метеорологическая организация (ВМО) сотрудничали, чтобы проверить возможность запуска оперативного ЧПП LAM в коммерческих службах облачных вычислений. В рамках выполняемых в настоящее время региональных мероприятий Всемирного банка и ВМО по оказанию помощи в модернизации гидрометеорологических служб в Центральной Азии пилотный проект LAM охватил репрезентативную территорию площадью 2,6 млн км<sup>2</sup> с горизонтальным разрешением 3,2 км (в результате чего было получено 238 844 ячейки

сетки) с 65 вертикальными уровнями модели. 72-часовые прогнозы выполнялись с 8640 временными интервалами по 30 секунд.

Контейнерная версия модели ICON ЧПП была протестирована с этой конфигурацией на трех крупных коммерческих провайдерах облачных вычислений. Использование контейнеризации значительно упростило установку ICON в облаке, а после настройки процесс портирования от одного провайдера облачных вычислений к другому не был сложным и не занимал много времени, при условии, что были настроены необходимые учетные записи пользователей и платежи. Выбор конфигураций вычислительных узлов у провайдеров облачных вычислений был направлен на то, чтобы продолжительность выполнения прогнозов не превышала 30 минут, чтобы смоделировать время оперативной метеорологической обработки, необходимое НМГС. Для запуска модели в облаке и загрузки результатов (>34 ГБ) в соответствии с требованиями оперативной метеорологии достаточно стандартного подключения к интернету со скоростью, обычно доступной в Центральной Азии.

В будущем DWD и консорциум COSMO по-прежнему будут использовать контейнеризацию как современный подход к выпуску ICON и его обновлений, требующий только загрузки и запуска большого файла для установки. Когда своевременные начальные состояния и системы моделей ЧПП предоставляются одним из крупных центров ЧПП, таким как DWD, для настройки и использования прогнозов ЧПП в облачных службах, НМГС, как представляется, требуются как минимум два специалиста: один специалист по ИКТ, который работает с облаком, и один оперативный сотрудник с навыками работы с ЧПП. Однако следует отметить, что требуемые знания и навыки в области ИКТ, вероятно, несколько отличаются от тех, которыми обычно обладают стандартные специалисты НМГС в области ИКТ.

Тестирование вышеуказанной установки привело к консервативной оценке затрат менее 30 долларов США на один прогнозный прогон. Используя консервативные предположения и оценки затрат на предварительную и последующую обработку, общие годовые затраты на запуск модели в облаке (два раза в день) составят примерно 50 000 долларов США. Это намного ниже годовых затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание (ЭИТО) стандартного ВПК, необходимого для работы такой модели ЧПП, которые оцениваются в среднем в 150 000-300 000 долларов США в год. Это, конечно же, идет в дополнение к капитальным затратам на приобретение ВПК и необходимых вспомогательных средств, которые оцениваются примерно в 1 миллион долларов США.

Таким образом, представляется, что выполнение ЧПП на коммерческом провайдере облачных вычислений может быть привлекательной альтернативой приобретению и обслуживанию ВПК для той же цели, особенно для НМГС с ограниченными ресурсами. Часто возникают проблемы с мобилизацией достаточного бюджета, а также с привлечением и удержанием технического персонала для обслуживания высокопроизводительных вычислений, поэтому стоит изучить возможность решения данной задачи путем использования коммерческих провайдеров, что сопровождается сравнительно небольшими затратами. Облачное решение также позволит НМГС переориентировать ограниченные ресурсы на последующую

обработку продуктов, созданных в облаке, таким образом, сосредоточив внимание и активизировав собственные мероприятия по ЧПП на конкретных задачах национального и местного значения.

Пилотирование ICONIC в Центральной Азии продолжается, чтобы обеспечить тестовый пример и справочную информацию для потенциального оперативного использования облачных вычислений для ЧПП НМГС по всему миру в соответствии с задачами вовлеченных партнеров. В то же время НМГС следует иметь в виду, что уровень точности и разрешения глобальных мезомасштабных моделей очень высок и будет продолжать улучшаться, в том числе в ансамблевом режиме. LAM обеспечивают значительные преимущества по сравнению с глобальными моделями только тогда, когда они выполняются со значительно более высоким разрешением и/или с ассимиляцией высококачественных местных наблюдений; последние еще не тестировались в рамках ICONIC и требуют большей вычислительной сложности и опыта, поскольку набор для ассимиляции данных должен быть портирован в облако в дополнение к модели ЧПП. Таким образом, решение о том, чтобы НМГС запускала собственный ЧПП, должно также учитывать существующие и будущие доступные глобальные продукты, а также то, каким образом LAM может повысить ценность предоставления улучшенного обслуживания.

Представленные здесь результаты обобщают подробный технический отчет о пилотировании ICONIC в Центральной Азии, доступный по ссылке<sup>1</sup>: [https://doi.org/10.5676/DWD\\_pub/nwv/icon\\_009](https://doi.org/10.5676/DWD_pub/nwv/icon_009)

<sup>1</sup> Прилл, Ф. и Эсер, К. (2022). ICONIC – ICON в облаке. Отчеты об ICON, выпуск 009, DWD и Института метеорологии им. Макса Планка.

# Сокращения

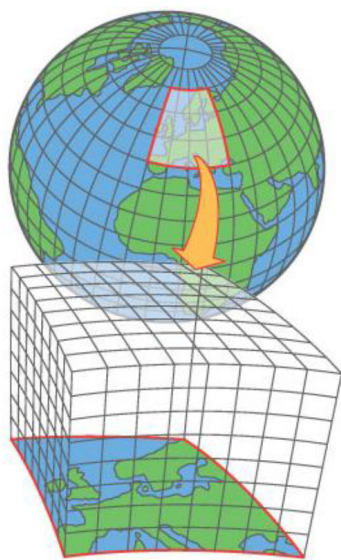
<b>CAFEWS</b>	Система раннего оповещения о наводнениях в Центральной Азии
<b>САНМР</b>	Проект модернизации гидрометеорологической службы в Центральной Азии (Всемирный банк)
<b>CAWEP</b>	Программа по водным и энергетическим ресурсам Центральной Азии (Всемирный банк)
<b>СНГ</b>	Содружество Независимых Государств
<b>COSMO</b>	Консорциум мелкомасштабного моделирования
<b>COSMO-CA</b>	COSMO Центральная Азия (модель ЧПП)
<b>ЦП</b>	Центральный процессор
<b>DWD</b>	Deutscher Wetterdienst (Немецкая метеорологическая служба)
<b>ECMWF</b>	Европейский центр среднесрочного прогнозирования погоды
<b>ENIAC</b>	Электронная цифровая вычислительная машина-интегратор
<b>ГБ</b>	Гигабайт
<b>GFDRR</b>	Глобальный фонд по уменьшению опасности стихийных бедствий и восстановлению
<b>ВНД</b>	Валовой национальный доход
<b>GPC</b>	Глобальный центр выработки данных
<b>ВПК</b>	Высокопроизводительный компьютер
<b>ICON</b>	Икосаэдрический Негидростатический (модель ЧПП)
<b>ICONIC</b>	ICON в облаке (ICON-In-the-Cloud)
<b>ИКТ</b>	Информационные и коммуникационные технологии
<b>IMS</b>	Метеорологическая служба Израиля
<b>МСЭ</b>	Международный союз электросвязи
<b>LAM</b>	Модель для ограниченной территории
<b>МРІ</b>	Интерфейс передачи сообщений
<b>NCER</b>	Национальные центры экологического прогнозирования (США)
<b>НМГС</b>	Национальная метеорологическая и гидрологическая служба
<b>ЧПП</b>	Численный Прогноз Погоды
<b>ЭиТО</b>	Эксплуатация и техническое обслуживание
<b>РАСТ</b>	Программа связи и торговли в Азии (Всемирный банк)
<b>PMU</b>	Отдел управления проектом (САНМР)
<b>РСМЦ</b>	Региональный специализированный метеорологический центр (ВМО)
<b>ВМО</b>	Всемирная метеорологическая организация
<b>24/7</b>	Двадцать четыре часа в сутки, семь дней в неделю (бесперебойная работа)



# 1. Численное прогнозирование погоды и вычисления

Численное прогнозирование погоды (ЧПП) использует математические модели для прогнозирования погоды, представляя атмосферу в виде трехмерной сетки, на которой выполняются расчеты (Рисунок 1). ЧПП высокого разрешения имеет решающее значение для улучшения прогнозирования ожидаемых метеорологических условий, особенно экстремальных явлений. Оно предоставляет пространственную и временную информацию с высоким разрешением о потенциально интенсивных осадках, ветре, температуре и других атмосферных явлениях, которые могут способствовать лучшему прогнозированию надвигающихся стихийных бедствий. Принимая во внимание изменение климата и связанное с этим возрастание частоты и масштабов опасных природных явлений, значение ЧПП для операций и служб информации и предупреждений национальных метеорологических и гидрологических служб (НМГС) не следует недооценивать. Постоянно повышающаяся точность современного прогнозирования погоды была бы невозможна без ЧПП..

**Рисунок 1: Схематический пример дискретизации атмосферы над Европой с помощью расчетной сетки для ЧПП.<sup>2</sup>**



В 1949 году первому компьютеру, который затем использовался для прогнозирования погоды, потребовалось около одного дня, чтобы вычислить предсказание на 24 часа.<sup>3</sup> С тех пор ЧПП и высокопроизводительные компьютеры (ВПК) стали важными компонентами систем прогнозирования погоды, воды и климата. Модели ЧПП используются в глобальном масштабе или для доменов с ограниченной территорией (LAM), охватывающих определенные регионы или страны, с высоким временным и пространственным разрешением, чтобы лучше понимать атмосферные явления и получать более актуальную для местных условий информацию. Операции ЧПП для LAM требуют больших объемов глобальных наборов данных (начальные и граничные условия) для поддержки производства локализованных данных и информации для прогнозирования, предсказания, предупреждения и связанного обслуживания.

Эти глобальные наборы данных доступны для загрузки глобальными центрами выработки данных (GPC), такими как Deutscher Wetterdienst (DWD), Национальными центрами прогнозирования окружающей среды США (NCEP) и Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Они открыты и свободно доступны для государств-членов

<sup>2</sup> Источник: Крейг, Г. (2021). Введение во внутренне стохастическую параметризацию, презентация для онлайн-мероприятия «Стохастический семинар» рабочей группы COSMO 7 (предсказуемость и ансамблевый метод), 2-3 марта 2021 г

<sup>3</sup> Электронная цифровая вычислительная машина-интегратор (ENIAC) находилась в ведении Университета Пенсильвании, США.

Всемирной метеорологической организации (ВМО) в соответствии с Единой политикой международного обмена данными о системе Земля.<sup>4</sup>

Запуск ЧПП на локальном ВПК имеет такие преимущества, как минимизация потенциальных задержек сети и узлов (временных задержек или лагов), аппаратное обеспечение может быть оптимально настроено для вычислительных потребностей ЧПП, и некоторые учреждения отдают ему предпочтение для обеспечения безопасности и конфиденциальности данных и информации. В целом, во многих секторах установка и использование локальных высокопроизводительных вычислений доказала свою эффективность в плане окупаемости инвестиций.<sup>5</sup> Однако высокопроизводительные компьютеры стали менее привлекательными с финансовой точки зрения (средняя и постоянно растущая стоимость работы узла составляет 0,12 доллара США в час), и с каждым годом они все больше теряют свою финансовую конкурентоспособность.<sup>6</sup> Кроме того, локальные системы высокопроизводительных вычислений необходимо обновлять / модернизировать примерно раз в пять лет, что дополнительно влечет за собой дорогостоящий и требующий большого объема знаний перенос данных, который часто увеличивает первоначальную стоимость машины на 50%.

Операционная негибкость ВПК также может привести к периодам как недостаточного, так и чрезмерного использования, снижая, тем самым, операционную и экономическую эффективность. Локальные системы высокопроизводительных вычислений часто требуют дополнительного времени ожидания, что приводит к снижению производительности. Например, как показали результаты опроса 2018 года, 72,8% предприятий, использующих ВПК, сообщили о том, что задачи иногда либо задерживаются, либо отменяются; 29,2% сообщили, что они сокращают объем выполняемой ими рабочей нагрузки на 50% в год, а 38% задач ВПК регистрируются как «задачи, которые невозможно завершить».<sup>7</sup> Это значительно снижает окупаемость инвестиций в ВПК.

Из-за нехватки ресурсов и мощностей НМГС часто с трудом справляются с эксплуатацией и обслуживанием высокопроизводительных вычислений, что требует дорогостоящих инвестиций в оборудование и инфраструктуру, а также значительных регулярных бюджетов на техническое обслуживание, электроснабжение, охлаждение и квалифицированный персонал. В то же время облачные хранилища данных и вычислений становятся все более доступными и приемлемыми по цене.

Облачные вычисления также обеспечивают гибкость масштабирования используемых вычислительных ресурсов в соответствии с операционными потребностями. На Рисунке 2 показано сравнение планирования нескольких вычислительных заданий в течение нескольких дней в локальной системе ВПК и в облачной системе. Можно видеть, что облачное решение позволяет больше планировать на основе потребностей и потенциально масштабировать вычислительную мощность для более быстрого выполнения больших заданий, что приводит к более своевременному выполнению заданий в соответствии с потребностями оператора.

<sup>4</sup> Единая политика ВМО в отношении данных — это международное соглашение, регулирующее свободный обмен данными о погоде, воде и климате, связанными с системой Земли, между 193 государствами-членами и территориями ВМО, доступное по адресу: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=11256](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11256)

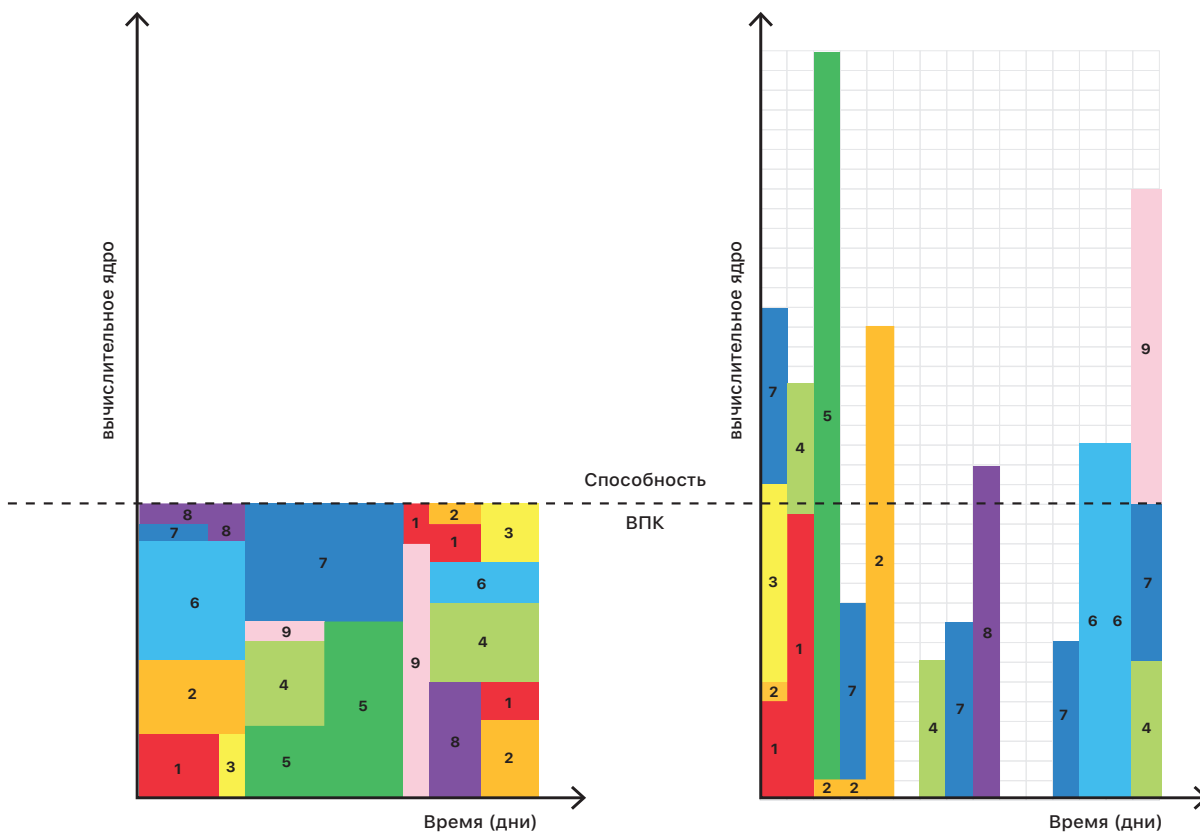
<sup>5</sup> См., например: <https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/products/ready-solutions/industry-market/hyperion-hpc-investment-brings-high-re-turns.pdf>

<sup>6</sup> <https://rescale.com/blog/the-real-cost-of-high-performance-computing/>

<sup>7</sup> Исследования Гипериона (2018). Обновление исследования окупаемости инвестиций в ВПК: экономические модели финансовой окупаемости инвестиций и инноваций в результате инвестиций в ВПК.

Например, задание 5 (выделено зеленым цветом) на Рисунке 2 необходимо распределить на четыре дня на ВПК (левая часть рисунка), чтобы выполнить другие более срочные вычислительные задания, использующие ограниченную вычислительную мощность ВПК. При использовании облачного решения (правая часть рисунка) задание 5 выполняется за один день благодаря преимуществам масштабируемости облака (почти полное отсутствие ограничений по вычислительной мощности) и более быстрому выполнению других, более срочных заданий. При этом в определенные дни в облаке не выполняются никакие задания, что не влечет за собой затрат. Гибкий подход по запросу, обеспечиваемый облачными вычислениями, как правило, более эффективен и экономичен.

**Рисунок 2. Графики вычислительных заданий на несколько дней и для различных потребностей в вычислительных ресурсах (количество ядер) для ВПК слева (максимальные вычислительные ресурсы ВПК - «Ограничение мощности центра обработки данных») и облачных вычислений справа. Цвета и числа обозначают дискретные вычислительные задания.<sup>8</sup>**



В то время как установка и эксплуатация ВПК является дорогостоящей, сложной и ограничивающей гибкость при планировании работ, а облачные вычисления стали доступными и предлагают большую гибкость, не требуя значительных капитальных вложений, это может быть привлекательным вариантом для НМГС, намеревающихся запустить LAM ЧПП, для использования облачных вычислений с целью оперативного прогнозирования.

<sup>8</sup> Источник: AWS и Intel (2019 г.). О чем не расскажет анализ совокупной стоимости владения: копните глубже, чтобы узнать реальную стоимость ваших инвестиций в высокопроизводительные вычисления в локальной среде, технический документ по экономике высокопроизводительных вычислений, Amazon Web Services.

## 2. Партнерство в Центральной Азии

Всемирный банк оказывает поддержку национальным метеорологическим и гидрологическим службам (НМГС) Центральной Азии уже более десяти лет – прежде всего, в рамках Проекта модернизации гидрометеорологической службы в Центральной Азии (САНМР<sup>9</sup>), а также путем оказания технической помощи и проведения аналитических мероприятий. За это время ЧПП продолжало быстро развиваться и расширяться; при этом, некоторые НМГС Центральной Азии внедряли ЧПП в свою деятельность, однако с разной степенью успеха. Признание преимуществ и, следовательно, спрос на ЧПП высокого разрешения в регионе продолжает расти.

Чтобы помочь обеспечить доступ к ЧПП для всей Центральной Азии, САНМР установил ВПК в Региональном специализированном метеорологическом центре (РСМЦ) в Ташкенте (Узбекистан) на базе Узгидромета. Были созданы модели COSMO<sup>10</sup> для ограниченной территории (LAM) для двух областей, одна из которых охватывает всю Центральную Азию с горизонтальным разрешением 6,6 км, а другая охватывает высокогорный регион на юго-востоке Центральной Азии с разрешением 2,2 км. Однако РСМЦ испытывал трудности с эксплуатацией и поддержанием как модели ВПК, так и модели ЧПП, сопровождающимися с регулярными перерывами в обслуживании и часто с региональными проблемами по обмену и получению данных.

Признавая важность ЧПП для современного гидрометеорологического прогнозирования, а также ограничения, с которыми сталкиваются многие НМГС в плане мобилизации достаточных оперативных бюджетов, а также привлечения и удержания необходимых квалифицированных специалистов, Всемирный банк изучает инновационные подходы к использованию современных технологий и подходов за счет устойчивых инвестиций, которые помогают НМГС выполнять свои общественные обязанности.<sup>11</sup> Было определено, что использование глобальных и региональных систем, облачные вычисления и более активное взаимодействие с частным сектором<sup>12</sup> потенциально открывают значительные возможности для повышения производительности и эффективности НМГС в современную эпоху.

DWD поддерживает НМГС во всем мире уже более 20 лет, и его региональные модели бесплатны для развивающихся стран и университетов. Различные службы поддержки предназначены для НМГС и научных пользователей, которые планируют использовать региональные модели DWD. Эти вспомогательные мероприятия варьируются от обучающих мероприятий до «классических» каналов поддержки, например, списков рассылки и веб-сайтов с часто задаваемыми вопросами, до индивидуальной помощи на месте.

После нескольких неформальных бесед на полях глобальных мероприятий ВМО и дальнейшего содействия благодаря взаимным связям в MeteoSwiss делегация Всемирного

<sup>9</sup> <https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P120788>

<sup>10</sup> <https://www.cosmo-model.org/>

<sup>11</sup> См. Всемирный банк и GFDRR (2019 г.): *Выдерживая изменения: как улучшить гидрометеорологические службы в развивающихся странах?*

<sup>12</sup> См. Всемирный банк и GFDRR (2020 г.): *Сила партнерства: участие государственного и частного секторов в гидрометеорологических службах.*

банка и ВМО посетила DWD в июне 2019 года для изучения возможностей сотрудничества в области ЧПП в Центральной Азии. К встрече также присоединились представители членов COSMO MeteoSwiss и Метеорологической службы Израиля (IMS) – последняя независимо протестировала традиционную установку ICON на облачном оборудовании. DWD представила собственную стратегию современного развертывания ICON, портируемой цепочки процессов на основе программных контейнеров собственной разработки, которая стала отправной точкой проекта «ICON-in-the-cloud» (позже названного «ICONIC»).

Участники совещания согласились с тем, что Центральная Азия является хорошей территорией для пилотного проекта ICONIC, учитывая ее заинтересованность в расширении оперативного использования ЧПП и потребность в моделировании с высоким разрешением в ее высокогорном регионе, с хребтами Памира и Тянь-Шаня, включая несколько пиков высотой более 7000 м над уровнем моря. В то время как у DWD были ограниченные официальные отношения с НМГС Центральной Азии, Всемирный банк привнес несколько лет партнерства и опыта работы в регионе, включая знания о возможностях, ограничениях и национальных операционных контекстах. Поскольку ВМО предоставляла и продолжает предоставлять технические рекомендации Всемирному банку и НМГС в Центральной Азии, ее поддержка партнерства также считалась критически важной. Затем, на региональном совещании САНМР в октябре 2019 года, Всемирный банк и ВМО представили идею пилотного запуска ICONIC представителям НМГС Центральной Азии, которые выразили свою поддержку.

Партнерство было официально оформлено в 2020 году, после чего в 2021 и 2022 годах была проведена серия координационных совещаний, все из которых были проведены в виртуальном формате из-за пандемии COVID-19. Учитывая очевидные связи с САНМР и потенциал для будущей интеграции в Систему раннего предупреждения о наводнениях в Центральной Азии (CAFEWS<sup>13</sup>), которая в настоящее время находится на стадии разработки, к встречам также присоединились представители Группы управления проектом (ГУП) САНМР. На совещаниях были согласованы многие технические детали области моделирования, тестирования коммерческих облачных вычислений, развертывания пилотного проекта в НМГС и возможностей для дальнейших действий.

Представленные здесь результаты обобщают результаты, подробно рассмотренные в техническом отчете об испытаниях ICONIC в Центральной Азии:<sup>14</sup> [https://doi.org/10.5676/DWD\\_pub/nwv/icon\\_009](https://doi.org/10.5676/DWD_pub/nwv/icon_009)

<sup>13</sup> <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2021/12/10/cafews>

<sup>14</sup> Прилл, Ф. и Эсер, К. (2022). ICONIC – ICON в облаке. Отчеты об ICON, выпуск 009, DWD и Института метеорологии им. Макса Планка.

### 3. Домен и конфигурация модели

Домен LAM, используемый для тестирования ICONIC в Центральной Азии, показан на Рисунке 3. Было определено, что он должен включать, по крайней мере, часть территории всех стран Центральной Азии, охватывать высокогорный регион на юго-востоке Центральной Азии и быть достаточно большим для того, чтобы требовать значительных вычислительных мощностей для запуска модели с рабочим разрешением. Выбранный участок имеет размеры примерно 2 000 км (по долготе) на 1 300 км (по широте), охватывая общую площадь 2,6 млн км<sup>2</sup>. Было использовано горизонтальное разрешение (размер сетки) 3,2 км, в результате чего было получено 238 844 ячейки сетки с 65 вертикальными уровнями модели до верхней вертикальной высоты 22 км.

Рисунок 3. Домен LAM, используемый для тестирования ICONIC.



Чтобы смоделировать реалистичную рабочую нагрузку, в качестве сценария тестирования использовался 72-часовой (3-дневный) прогнозируемый запуск, который генерировал около 34,6 ГБ выходных данных за запуск.<sup>15</sup> Следует отметить, что при выборе тестовой области и конфигурации модели руководствовались чисто техническими соображениями. Анализ качества результатов метеорологического прогнозирования, который включал бы детальную параметризацию и проверку, выходил за рамки пилотного проекта ICONIC. Тем не менее, это будет рассмотрено на возможных последующих этапах тестирования в Центральной Азии.

<sup>15</sup> В прогоне использовались 8640 шагов модели с временным шагом (интервалом) 30 секунд.

## 4. Тестирование

Были проведены тесты для изучения возможности запуска модели ЧПП на коммерческих провайдерах облачных вычислений при использовании возможности установить систему на базовом уровне. Принимая во внимание часто ограниченные возможности и ресурсы клиентов Всемирного банка, стремясь использовать соотношение цены и качества, которое может обеспечить рынок ИКТ, тесты были нацелены на конкретное изучение простоты развертывания, портируемости от одного провайдера облачных вычислений к другому, достаточности в удовлетворение потребностей в оперативном прогнозировании и экономической эффективности. В ходе испытаний была успешно проведена контейнеризация модели (см. вставку ниже), реализация цепочки процессов ЧПП с помощью управляющих сценариев и веб-интерфейса, а также демонстрация портируемости подхода на коммерческих облачных провайдерах.

### ЧТО ТАКОЕ КОНТЕЙНЕРИЗАЦИЯ?

RedHat предлагает простое для понимания объяснение

(<https://www.redhat.com/en/topics/cloud-native-apps/what-is-containerization>):

«Контейнеризация – это объединение программного кода со всеми его необходимыми компонентами, такими как библиотеки, фреймворки и другие зависимости, чтобы они были изолированы в своем собственном «контейнере». Это делается для того, чтобы программное обеспечение или приложение внутри контейнера можно было перемещать и последовательно запускать в любой среде и на любой инфраструктуре, независимо от этой среды или операционной системы инфраструктуры. Контейнер действует как своего рода пузырь или вычислительная среда, окружающая приложение и сохраняющая его независимость от своего окружения. По сути, это – полнофункциональная и портируемая вычислительная среда».

Многочисленные коммерческие облачные провайдеры предлагают вычислительные ресурсы, хранилища и сетевые ресурсы в качестве бизнес-модели. В то время как облачное оборудование изначально было ориентировано на небольшие и гибкие сервисы, в последние годы портфель их услуг расширился за счет включения высокопроизводительных вычислительных рабочих нагрузок. Это сделало запуск контейнеров в облаке привлекательным для приложений высокопроизводительных вычислений, а также для метеорологии. Для пилотного проекта ICONIC были выбраны Amazon Web Services, Google Cloud Platform и Microsoft Azure из-за их глобального повсеместного распространения; в настоящее время на их долю приходится значительно больше 50% доли мирового рынка.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Анализ облачных каналов: <https://www.canalys.com/analysis/cloud-channels>

## 5. Опыт и результаты

Облачные вычисления предполагают использование нескольких аппаратных серверов (физических машин), называемых «узлами». Для более крупных вычислительных задач узлы соединяются, чтобы их можно было использовать вместе, что называется «кластером». При запуске приложения в облаке создается «экземпляр» (виртуальный вычислительный узел), который для пользователя представляет собой единую виртуальную машину. В то время как экземпляр представляет собой одну машину в программном обеспечении, на практике он обычно работает на нескольких кластерах узлов.

### 5.1. Настройка модели

Настройка ICON в облаке включала, прежде всего, разработку контейнеров, обеспечение надлежащего потока данных в контейнеры, между ними и из них, а также планирование нескольких заданий, необходимых для запуска ЧПП, более подробно описываемых в Приложении. Чтобы снизить затраты, ICONIC использовала разные классы оборудования для разных задач. В то время как выполнение ЧПП требует больших вычислительных и сетевых ресурсов, для предварительной и последующей обработки требуются машины гораздо меньшего размера, но они требуют значительного ввода/вывода данных. Кроме того, львиная доля кластера, его вычислительные узлы, не нужны постоянно (24 часа в сутки, 7 дней в неделю). Вместо этого требуемое оборудование запрашивается непосредственно перед выполнением задания, что называется «автоматическое масштабирование». Хотя автоматическое масштабирование влечет за собой дополнительное время запуска, оно значительно более экономично, и за развертывание узла не взимается никакой платы. Во время этого пилотного проекта постобработка ICONIC включала только базовую визуализацию прогноза ЧПП.

После настройки учетной записи и регистрации платежа, а также когда все внешние параметры подготовлены и библиотеки для облачных контейнеров доступны, настройка нового облачного ICONIC возможна менее чем за один час. Хотя в Разделе 5.2 обобщаются необходимые навыки работы с ИКТ, следует отметить, что, поскольку DWD уже настроила контейнеры, для настройки стека программного обеспечения не требуется специальных знаний, поскольку доступны программные зависимости или версии библиотек для ICON.

### 5.2. Оптимизация облачных сервисов

Коммерческие облачные провайдеры позволяют пользователям выбирать экземпляры и кластеры, которые обеспечивают разную вычислительную мощность по разной цене. Таким образом, в зависимости от потребностей пользователь может оптимизировать расходы, обеспечивая при этом своевременное выполнение своих вычислительных задач. Облачные провайдеры также предлагают узлы и кластеры, расположенные в разных регионах мира, что оказывает существенное влияние на затраты. Пилотирование показало, что умеренные требования к облачному оборудованию — межсетевое соединение 25 Gigabit Ethernet и



многоядерные процессоры общего назначения (центральные процессоры) по требованию — были достаточными для тестовой настройки ICONIC в Центральной Азии.

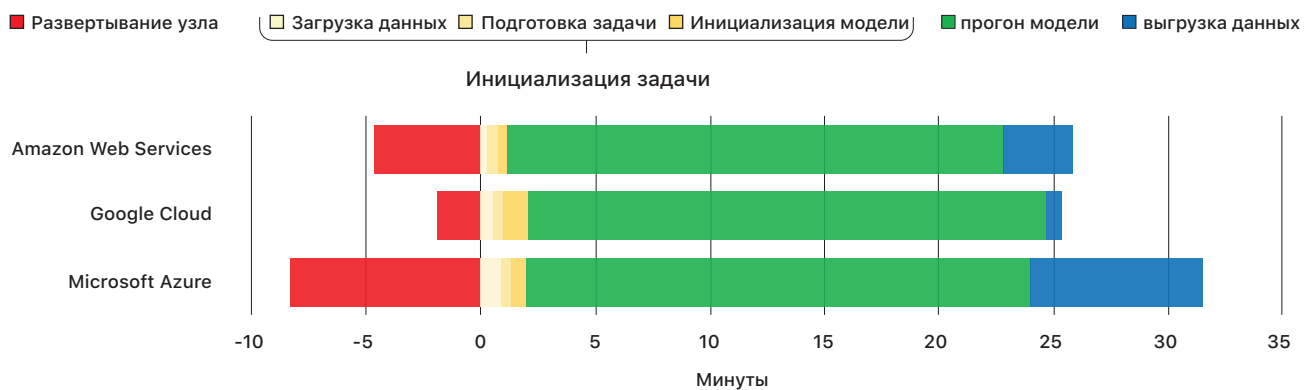
Оптимизация настройки облака требует опыта, навыков и понимания соответствующего провайдера облачных вычислений, поставщика программного обеспечения для облака, дистрибутива Linux, диспетчера рабочей нагрузки, контейнеризации, интерфейса передачи сообщений (MPI), многопоточности, ICON и т. д. Это может отличаться от стандартных возможностей персонала НМГС, которым обычно требуются только базовые навыки работы с Linux и знание моделей прогнозирования и программного обеспечения.

### 5.3. Время прогнозирования

В ходе тестирования отслеживалось время, необходимое для запуска модели по следующим категориям (средние результаты показаны на Рисунке 4):

- **Развертывание узла:** время, необходимое для запуска виртуальных узлов, т.е. время, затрачиваемое между отправкой задания и его выполнением. Обратите внимание, что за развертывание узла плата обычно не взимается. Однако, поскольку большое количество небольших узлов может быть трудно зарезервировать по запросу, это увеличивает время, необходимое для инициализации модели.
- **Время инициализации:** на этом этапе все необходимые данные загружаются из облачного хранилища, создается каталог задания и заполняется всеми необходимыми файлами конфигурации, а также инициализируется модель.
- **Время выполнения модели:** фактическое выполнение ЧПП.
- **Время загрузки данных:** загрузка выходных данных прогноза СПП в облачное хранилище. Это может частично происходить одновременно с запуском модели.

Рисунок 4. Сравнение времени выполнения, необходимого для 72-часового (3-дневного) прогноза для модели ICONIC Central Asia с использованием конфигураций тестовых узлов на трех облачных провайдерах. Общее время инициализации задания считается суммой времени загрузки данных, подготовки задания и инициализации модели.<sup>17</sup>



<sup>17</sup> На этом рисунке не отображены общие заявления о различных провайдерах облачных вычислений и рекомендации относительно передовой практики. Общие условия и расчет цены описаны в тексте. Выбранную конфигурацию следует понимать как экспериментальную, и необходимы дальнейшие испытания.

Выбор кластеров был направлен на то, чтобы ограничить время прогнозирования максимум 30 минутами, что считается достаточным для нужд оперативного прогнозирования. Хотя, как показано в Таблице 1, инициализация заданий играет незначительную роль с точки зрения затрат, использование меньшего количества крупных узлов окупается с точки зрения экономической эффективности. Кроме того, промежутки времени для развертывания узла и загрузки данных значительно различаются. Это становится важным критерием оптимизации и выбора провайдера. Фаза загрузки данных может быть значительно сокращена за счет дублирования с фактическим расчетом прогноза. Однако продолжительность фазы развертывания в модели оплаты по требованию по существу предопределена настройками облачного провайдера. Наконец, было замечено относительно небольшое влияние пропускной способности сети на время выполнения модели.

## 5.4. Портруемость

Все основные провайдеры облачных вычислений поддерживают программные контейнеры, а это означает, что контейнерная модель ICONIC может быть развернута на любом из них. В качестве одной из основных целей ICONIC настройка ICON фокусируется на готовом оборудовании общего назначения. Это повышает экономическую эффективность и, в то же время, соответствует ограничениям портруемости ICONIC, позволяя избежать привязки к провайдеру. На самом деле это требование приводит к затратам всякий раз, когда имеется специализированное оборудование для ВПК: особенно крупномасштабные вычисления выигрывают от использования специальных библиотек для высокоскоростных межсоединений. Эти аспекты не были в центре внимания пилотного сценария, и, поэтому, в интересах портруемости контейнеры ICONIC это не учитывают.

Преимущество диспетчера рабочих нагрузок Slurm заключалось в том, что установку ICONIC можно было с минимальными усилиями передать другим облачным провайдерам, а перенос сценариев заданий в локальные системные установки также упростился. Многие коммерческие облачные провайдеры предлагают средства для установки программного обеспечения Slurm для этой цели. Был настроен дополнительный контейнер «icon-administration», в котором собраны необходимые инструменты и скрипты для создания установки Slurm для каждого из протестированных провайдеров. Тестирование показало, что перенос ICONIC к другому облачному провайдеру возможен в кратчайшие сроки; настройка работы нового облачного кластера ICONIC возможна менее чем за час (не считая времени, необходимого для настройки облачного аккаунта и регистрации платежей).

## 5.5. Расходы

Модели ценообразования коммерческих облачных сред обычно основаны на долгосрочных расчетных постоянных нагрузках. Однако оперативный ЧПП генерирует кратковременные пики нагрузки (например, один или два раза в день для региональных LAM), в то время как требования к ресурсам в периоды между запусками довольно низки. Поэтому в качестве технического решения необходимо использовать динамически изменяемый (автомасштабируемый) вычислительный кластер.

Более того, здесь скорее всего будет рассматриваться стоимостная модель оплаты по требованию («оплата по мере использования»). Одним из преимуществ этой модели оплаты является максимальная гибкость в отношении выбранной платформы. Зарезервированные облачные экземпляры (обычно предлагаемые со скидкой в размере примерно 40%) не будут экономически эффективными, если ежедневная рабочая нагрузка не превышает 14-15 часов.

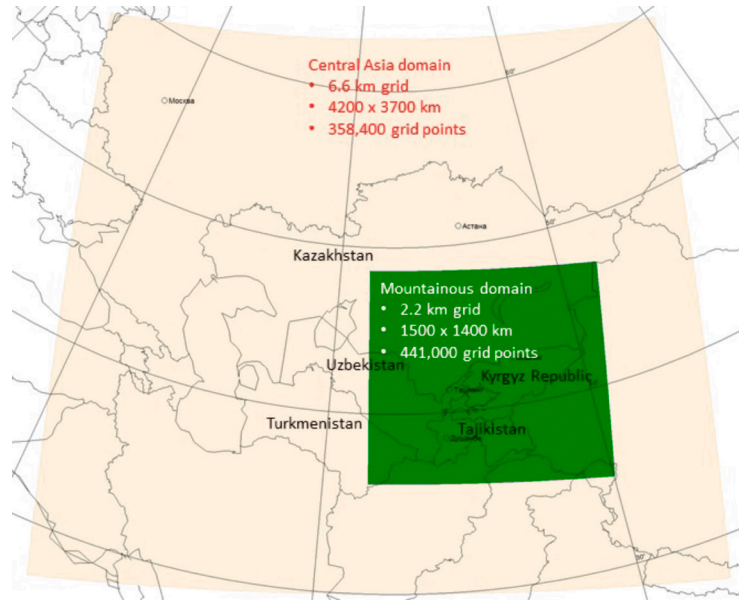
Тестирование показало, что если установка ICONIC будет работать непрерывно в облаке с двумя запусками 72-часовых прогнозов каждый день – опять же, с целью ограничить время работы максимум 30 минутами, – будут понесены среднегодовые затраты, указанные в Таблице 1. Это приводит к консервативной оценке затрат в размере **менее 30 долларов США** за запуск. Используя консервативные предположения и оценки затрат на предварительную и последующую обработку, **общие годовые затраты без передачи данных составят примерно 50 000 долларов США.**

**Таблица 1: Среднегодовые затраты на вычисления для операционной системы ICONIC в Центральной Азии (приблизительная оценка)**

Услуга	Годовая стоимость (долл. США)
Узел подключения 24/7	1,200 долларов США
Вычислительные узлы	< 30,000 долларов США
Диск хранения данных	120 долларов США
Входящая передача данных	бесплатно
Исходящая передача данных	0,09 долларов США/ГБ
Простая услуга хранения данных	< 120 долларов США
Реестр, шлюз и т.д.	< 60 долларов США

Затраты, конечно, зависят от необходимой вычислительной мощности, которая в свою очередь зависит от размера и разрешения (вертикального и горизонтального) ЧПП LAM, а также от желаемого максимального времени работы. Для высокогорных районов Центральной Азии, вероятно, потребуется LAM с более высоким разрешением, чем тот, который был протестирован, например, с горизонтальным разрешением менее 2,5 км. Однако такое высокое разрешение не требуется для больших равнинных/степных участков в регионе. Вот почему текущая региональная установка COSMO-CA включает две модели: одну с областью разрешения 6,6 км для всего региона, а другую с областью разрешения 2,2 км для высокогорного субрегиона, как показано на Рисунке 5. Мобильность и экономическая эффективность ICONIC могут обеспечить такую настройку нескольких моделей для различных нужд, будь то региональные или национальные.

Рисунок 5: Домены LAM, используемые в настоящее время региональными моделями COSMO-SA.



## 6. Выводы

В целом представляется, что выполнение ЧПП у коммерческого провайдера облачных вычислений является привлекательной альтернативой приобретению и обслуживанию ВПК для той же цели, особенно для НМГС с ограниченными ресурсами. Таким НМГС, у которых часто возникают проблемы с привлечением и удержанием технического персонала, недостаточным бюджетом и даже с нестабильными источниками питания, стоит изучить возможность решения данной задачи путем использования коммерческих провайдеров, что сопровождается сравнительно небольшими затратами.

В то же время НМГС следует помнить о том, что уровень мастерства и разрешающая способность глобальных мезомасштабных моделей, используемых такими глобальными провайдерами, как DWD и ECMWF, в настоящее время очень высоки и будут продолжать улучшаться, в том числе в ансамблевом режиме. LAM обеспечивают значительные преимущества по сравнению с глобальными моделями лишь в том случае, если они выполняются со значительно более высоким разрешением и/или с ассимиляцией высококачественных локальных наблюдений с высоким разрешением. Однако пилотный проект ICONIC не тестировал контейнеризацию и операцию усвоения данных, что потребовало бы увеличения сложности передачи данных, мониторинга и вычислений, для чего, в свою очередь, потребовались бы более высокие технические навыки. Следовательно, первоначальное решение о локальном запуске ЧПП должно также учитывать существующие и будущие доступные глобальные продукты, а также то, как LAM может повысить ценность для предоставления услуг лучшего качества.<sup>18</sup>

НМГС могут столкнуться с политической реальностью, когда их головное министерство или другие соответствующие высшие учреждения центрального правительства предпочтут инвестировать в материальное оборудование, такое как ВПК. Расходы государственного бюджета на услуги коммерческих облачных провайдеров, особенно крупных западных транснациональных корпораций, могут быть политически сложными, даже если доказано, что они более рентабельны и устойчивы. Однако с чисто технической точки зрения следующие выводы могут послужить ориентиром при изучении потенциальных решений ЧПП.

### 6.1. Эффективность затрат

Пилотирование ICONIC показало, что запуск ЧПП LAM с 238 844 ячейками сетки, 65 вертикальными уровнями и 72-часовым прогнозом с 30-секундным временным шагом (интервалом) дважды в день будет стоить около 50 000 долларов США в год. Это считается максимально приближенной оценкой, основанной на информации, которая была получена во время тестирования. Кроме того, поскольку рынок облачных вычислений продолжает расти, ожидается, что цены на услуги будут продолжать снижаться.<sup>19</sup>

<sup>18</sup> См. Всемирный банк и GFDRR (2019 г.): Выдерживая изменения: как улучшить гидрометеорологические службы в развивающихся странах?

<sup>19</sup> <https://journal.uptimeinstitute.com/cloud-generations-drive-down-prices/>

Это можно сравнить с затратами на приобретение и эксплуатацию ВПК для той же цели. В рамках САНМР одна из центральноазиатских НМГС в 2017 году приобрела систему ВПК и вспомогательные средства на сумму 1,1 млн долларов США, включая серверные помещения (кондиционирование воздуха, изоляция, системы управления пожаром, фальшполы и т.д.) и вспомогательные системы поддержки (подключения к электросети, резервный источник питания, управление сетью и т.д.). Кроме того, в период с 2018 по 2022 год потребовались дополнительные инвестиции в размере 250 000 долларов США для модернизации системы ИКТ, устройств обеспечения безопасности и контроля доступа, а также локальной сети.

Учитывая общее снижение стоимости оборудования ИКТ, если бы такая же система была закуплена в 2022 году, общие капитальные затраты на инвестиции оцениваются чуть более чем в 610 000 долларов США. Облачная альтернатива на пятилетний период эксплуатации оценивается примерно в 230 000 долларов США (не включая расходы на персонал), а также не требует закупок и работ по установке оборудования и систем поддержки.<sup>20</sup> Для дальнейшего сравнения, другая НМГС Центральной Азии с хорошо зарекомендовавшей себя программой ЧПП тратит от 150 000 до 300 000 долларов США в год на эксплуатацию и техническое обслуживание (ЭиТО), включая расходы на персонал, занимающийся как ЧПП, так и ИКТ.

Эти цифры по Центральной Азии согласуются с оценками затрат на установку и эксплуатацию высокопроизводительных вычислений для ЧПП от НМГС по всему региону Европы и Центральной Азии.<sup>21</sup> Средние капитальные затраты на оборудование для запуска национальных и региональных моделей варьируются от 1 до 1,5 млн долларов США, а ежегодные затраты на эксплуатацию и обслуживание (включая время работы персонала) составляют от 200 000 до 250 000 долларов США. В глобальном масштабе ежегодные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание аппаратного и программного обеспечения ЧПП, включая время работы персонала, оцениваются в эквиваленте 10–30% капитальных затрат на приобретение и установку ВПК для запуска ЧПП.

Вышеупомянутые годовые затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание уже выше, чем расчетные затраты на запуск тех же моделей в облачных сервисах, и это без учета капитальных вложений, потерь из-за простоев, вызванных перебоями в подаче электроэнергии или хакерскими атаками, обслуживания серверов и т.д. Смета расходов обеспечивает финансовое обоснование изучения потенциальных облачных решений. Кроме того, системное оборудование, такое как аккумуляторы, источники бесперебойного питания, процессоры, хранилища и т.д., потребует модернизации примерно через пять лет, на что потребуется не менее 20–50% первоначальных инвестиций вместе с затратами на миграцию (перенос) данных.

Облачное решение также позволит НМГС переориентировать ограниченные ресурсы на постобработку продуктов, созданных в облаке, таким образом, лучше сосредоточив внимание и активизировав внутреннюю деятельность ЧПП на конкретных национальных и местных потребностях.

<sup>20</sup> Расчет стоимости производился с помощью калькулятора общей стоимости владения ВПК Microsoft: <https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/tco/calculator/>

<sup>21</sup> На основе информации из Хорватии, Казахстана, Кыргызской Республики, Румынии, Словении, Турции и Узбекистана.

## 6.2. Требования к подключению к Интернету и обеспечению безопасности

Запуски пилотной модели давали прогнозные результаты в размере 34,6 ГБ за запуск, которые загружались в выделенное облачное хранилище. Пользователи могут выбирать между информационными продуктами ICON в формате NetCDF и GRIB2, основанными на треугольной неструктурированной сетке ICON или уже интерполированными на обычные сетки широты и долготы. Идея обработки данных уже в облаке, реализованная в виде ограниченного прототипа контейнера «icon-post», была бы наиболее эффективным решением. В любом случае, этот объем данных не является чрезмерно большим, поэтому загрузка результатов даже при более медленном подключении к Интернету может обеспечивать своевременную поддержку оперативного прогнозирования.

По данным Международного союза электросвязи (МСЭ), по состоянию на январь 2022 года пропускная способность международного интернета, доступная для стран Содружества Независимых Государств (СНГ, членами которого являются все страны Центральной Азии), достигла 20 терабит в секунду.<sup>22,23</sup> Хотя это самый медленный показатель среди всех регионов, оцениваемых МСЭ, он почти вдвое превышает скорость, доступную для стран СНГ в 2018 году. Также в 2018 году средняя скорость загрузки, доступная для НМГС Центральной Азии, составляла 60 Мбит/с, а сейчас – минимум 100 Мегабит/сек. В результате, НМГС потребуется менее 30 минут для загрузки всего набора данных ICONIC объемом 34,6 ГБ. Если этого недостаточно для поддержки оперативного прогнозирования, альтернативным решением может быть только загрузка графических продуктов (графиков и карт). Интернет-соединение, конечно, также должно быть доступным и стабильным, когда это необходимо.

Средняя стоимость фиксированной широкополосной связи в СНГ оценивается примерно в 1,2% валового национального дохода (ВНД), что значительно ниже порога доступности, установленного Комиссией Организации Объединенных Наций по широкополосной связи для устойчивого развития в размере 2% ВНД. Однако в некоторых странах Центральной Азии средняя стоимость фиксированной широкополосной связи составляет 5-10% ВНД<sup>24</sup>. Несмотря на это, учитывая важность подключения к Интернету для метеорологического прогнозирования, его следует считать приоритетом для оперативного бюджетирования НМГС.

Ключевой проблемой, которую должны учитывать НМГС при аутсорсинге вычислительных услуг и даже хранения данных в облаке, является безопасность – в особенности, когда речь идет о данных, которые считаются либо предметом государственной безопасности, либо коммерческой ценности.

## 6.3. Требования к штатному ИКТ-персоналу

Для эксплуатации ЧПП в облачных службах требуется, как минимум, две должности: один специалист по ИКТ, который управляет облаком, и один ученый, обладающий навыками ЧПП.<sup>25</sup> Однако следует отметить, что требуемые знания и навыки в области ИКТ, вероятно,

<sup>22</sup> 1 терабит = 1 миллион мегабит

<sup>23</sup> МСЭ (2022 г.). Измерение цифрового развития: факты и цифры, 2021. Международный союз электросвязи, Женева, Швейцария.

<sup>24</sup> Там же

<sup>25</sup> Учитывая, что НМГС работают круглосуточно и без выходных, понятие двух «должностей», вероятно, потребует более двух человек для обеспечения надлежащего охвата всех смен/прогнозов прогнозов.

несколько отличаются от тех, которыми обычно обладают стандартные специалисты НМГС в области ИКТ.

В будущем процесс контейнеризации будет по-прежнему осуществляться DWD и консорциумом COSMO, как и все «традиционные» способы выпуска программного обеспечения ICON. Затем НМГС нужно будет только загрузить и запустить выпуск контейнера, поэтому для установки требуется просто загрузить и запустить большой файл, если зарегистрирована облачная учетная запись с достаточным количеством разрешений на передачу пакетов данных.

#### **6.4. Гибкость**

Основной задачей пилота было внедрение портативной настройки облака. После настройки перенос от одного провайдера облачных вычислений к другому не представляет сложности и не занимает много времени, при условии, что были настроены необходимые учетные записи пользователей и платежи. Это полезно для обеспечения того, чтобы НМГС могли воспользоваться преимуществами лучших возможностей по стоимости и качеству обслуживания, предлагаемых различными провайдерами облачных вычислений.

Настройка нескольких конфигураций LAM на одной конкретной платформе в принципе возможна, но пилотные испытания ICONIC не проводились. Программное обеспечение, конечно, должно быть адаптировано, и пользователь должен будет управлять планированием нескольких заданий. Однако, по сути, это то, что многие НМГС уже делают на своих физических серверах – например, две параллельные модели COSMO-CA, которые запускает РСМЦ Ташкент для Центральной Азии (см. Раздел 5.5).

#### **6.5. Зависимость от глобального поставщика ЧПП**

DWD и консорциум COSMO намереваются сделать ICON в контейнере для потенциального развертывания в облаке доступным для обладателей соответствующих лицензий. Для государственных учреждений, таких как НМГС, стоимость лицензирования невелика и зависит от ВВП их страны, а в некоторых случаях предлагается бесплатно. В то время как DWD, как правило, готова помочь в настройке конкретных LAM, сами НМГС не нуждаются в обширных навыках, если не будет изменена установка прогнозирования. DWD стремится обеспечить рабочие граничные условия для всех моделей ICON. Консорциум COSMO планирует предоставлять обновления программного обеспечения, поддержку и обучение в рамках своей лицензии на поддержку.



# Приложение: Настройка ICONIC

Настройка ICON в облаке включала, прежде всего, разработку контейнеров, обеспечение надлежащего потока данных в контейнеры, между ними и из них, а также планирование нескольких заданий, необходимых для запуска ЧПП. Среди доступных контейнерных продуктов были выбраны среды Singularity и Docker. Singularity (теперь – `apptainer`) – наиболее широко используемая контейнерная система для высокопроизводительных вычислений, в то время как Docker обычно считается фактическим стандартом для создания контейнеров и контейнерных приложений. Рабочий процесс ICONIC был настроен и организован в веб-приложении JupyterLab, которое является хорошо зарекомендовавшим себя в научном компьютерном сообществе программным обеспечением с открытым исходным кодом. JupyterLab предоставляет интерактивный веб-интерфейс, в котором описание этапов процесса ЧПП, метаданные и результаты представлены вместе в так называемых блокнотах.

Менеджер рабочей нагрузки Slurm служил серверной частью для ICONIC. Slurm предлагает базовые функции мониторинга и является одним из наиболее широко используемых планировщиков заданий с открытым исходным кодом для кластеров Linux и суперкомпьютеров. В его задачи входит управление очередью заданий и выполнение параллельных заданий на наборе выделенных кластеров. Его можно адаптировать для управления, масштабирования и обслуживания вычислительных узлов с контейнерными приложениями (так называемая «оркестровка контейнеров»). Также были протестированы два альтернативных инструмента оркестровки контейнеров, а именно Docker Swarm и Kubernetes, но в конечном итоге они не использовались, поскольку были предназначены, в первую очередь, для масштабирования микросервисов, не идеально подходящих для рабочих нагрузок ВПК.

Чтобы снизить затраты, ICONIC использовала разные классы оборудования для разных задач. В то время как выполнение ЧПП требует больших вычислительных и сетевых ресурсов, для предварительной и последующей обработки требуются машины гораздо меньшего размера, но они требуют значительного ввода/вывода данных. Кроме того, львиная часть кластера, вычислительные узлы, не нужны постоянно (24 часа в сутки, 7 дней в неделю). Вместо этого, необходимое оборудование запрашивается непосредственно перед выполнением задания. Это так называемое «автоматическое масштабирование» было важной задачей диспетчера рабочих нагрузок Slurm в ICONIC. Хотя автоматическое масштабирование влечет за собой дополнительное время запуска, оно значительно более экономично, и за развертывание узла не взимается никакой платы.

Общая последовательность запуска ICONIC:

Central services run on the head node (login node), which is a machine with comparably low computing power. This container hosts the *JupyterLab* web front-end for the NMHS operator and post-processing users. The head node runs 24/7 to minimize startup times.

1. Центральные службы работают на головном узле (узле подключения), который представляет собой машину со сравнительно низкой вычислительной мощностью.

В этом контейнере размещается веб-интерфейс JupyterLab для оператора НМГС и пользователей постобработки. Головной узел работает круглосуточно и без выходных (24/7), чтобы минимизировать время запуска.

2. Контейнер, в котором работает ICONIC, взаимодействует с менеджером рабочей нагрузки Slurm, который управляет автоматически масштабируемым кластером. Контроллер Slurm также работает круглосуточно и без выходных (24/7). В зависимости от выбранного облачного провайдера, этот сервис находится на головном узле или на отдельном дополнительном узле.
3. Вычислительные узлы, на которых работает фактическое программное обеспечение ЧПП, динамически распределяются по мере необходимости и освобождаются после завершения выполнения. На вычислительных узлах запускаются контейнеры трех разных типов. Эти службы не работают в интерактивном режиме, а управляются сценариями:
  - Один контейнер содержит все необходимые инструменты предварительной обработки. Они обрабатывают интерполяцию начальных и граничных условий в область ICONIC LAM, поскольку набор данных этих полей модели, предоставляемый DWD, определяется относительно глобальной вычислительной области DWD.
  - Другой контейнер запускает модель ICON ЧПП в режиме ограниченной области. Это требует больших ресурсов компьютера, поэтому работает как распределенная служба с использованием нескольких узлов и контейнеров с подходящим межсоединением.
  - Наконец, контейнер постобработки позволяет автоматически генерировать графические продукты. Постобработка ICONIC включает сценарии Python с графическими библиотеками и инструментами командной строки, но в пилотном режиме включает только базовую визуализацию прогноза ЧПП.

