Факультет географии и геоинформационных технологий НИУ ВШЭ

География глобальных изменений и геоинформационные технологии

Москва, 2026

Сопоставление спутниковых и глубоководных наблюдений цунами на примере Камчатского землетрясения 2025 года

Шабаева Светлана Андреевна, студентка факультета географии и геоинформационных технологий НИУ ВШЭ
Работа выполнена под руководством Тельновой Натальи Олеговны

Постановка проблемы и задачи исследования

Проблема исследования

Сильнейшее Камчатское землетрясение 30 июля 2025 года вызвало цунами, распространение которого удалось зарегистрировать с помощью почти синхронных спутниковых и глубоководных наблюдений.

Совмещение пространственных данных спутника SWOT и временных рядов станций DART позволяет оценить возможности интеграции дистанционных и контактных методов для оперативного мониторинга цунами и уточнения моделей его распространения.

Цель

Оценить возможности комплексного использования спутниковых и глубоководных наблюдений для мониторинга цунами на примере Камчатского землетрясения 2025 года.

Задачи

1. Рассмотреть современные методы регистрации и мониторинга цунами.
2. Собрать и подготовить данные SWOT и DART
3. Обработать спутниковые данные SWOT и выявить пространственную структуру волны.
4. Проанализировать временные ряды глубоководных станций DART.
5. Выполнить моделирование распространения цунами с использованием ComMIT.
6. Сопоставить спутниковые наблюдения, данные DART и результаты моделирования, оценить их информативность для мониторинга

Материалы и методы исследования

Использованные данные:

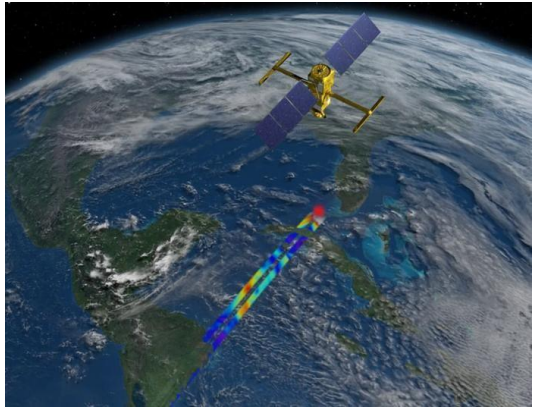
- Данные спутниковой интерферометрии SWOT
- Данные глубоководных буев DART

Программное обеспечение:

- Python - обработка данных SWOT
- ArcGIS -2D и 3D визуализация
- ComMIT - моделирование цунами на основе батиметрии

Методы

- Анализ спутниковых данных (интерферометрия KaRIn *Ka-band Radar Interferometer*).
- Анализ временных рядов (данные DART).
- Моделирование.



Спутник SWOT.
Источник:(https://svs.gsfc.nasa.gov/31198/)

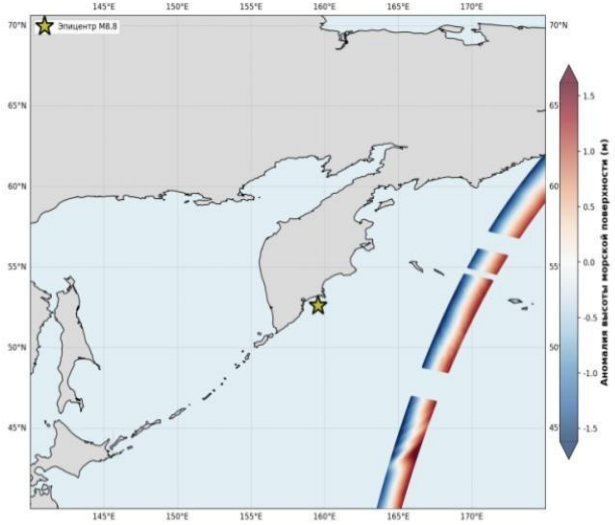
Источники открытых данных:
SWOT — NASA / PO.DAAC.
DART — NOAA / National Data Buoy Center, PMEL.
ComMIT — открытое программное обеспечение для моделирования цунами.



Буй DART.
Источник:(https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/?trk=public_profile_project-button)

Исходные матриалы

Спутник **SWOT** использует радиолокационную интерферометрию. Интерферометр KaRIn - прибор, измеряющий высоту поверхности, сравнивая сигналы полученные двумя антеннами спутника.



Визуализация исходных данных SWOT, данные продукта Expert.

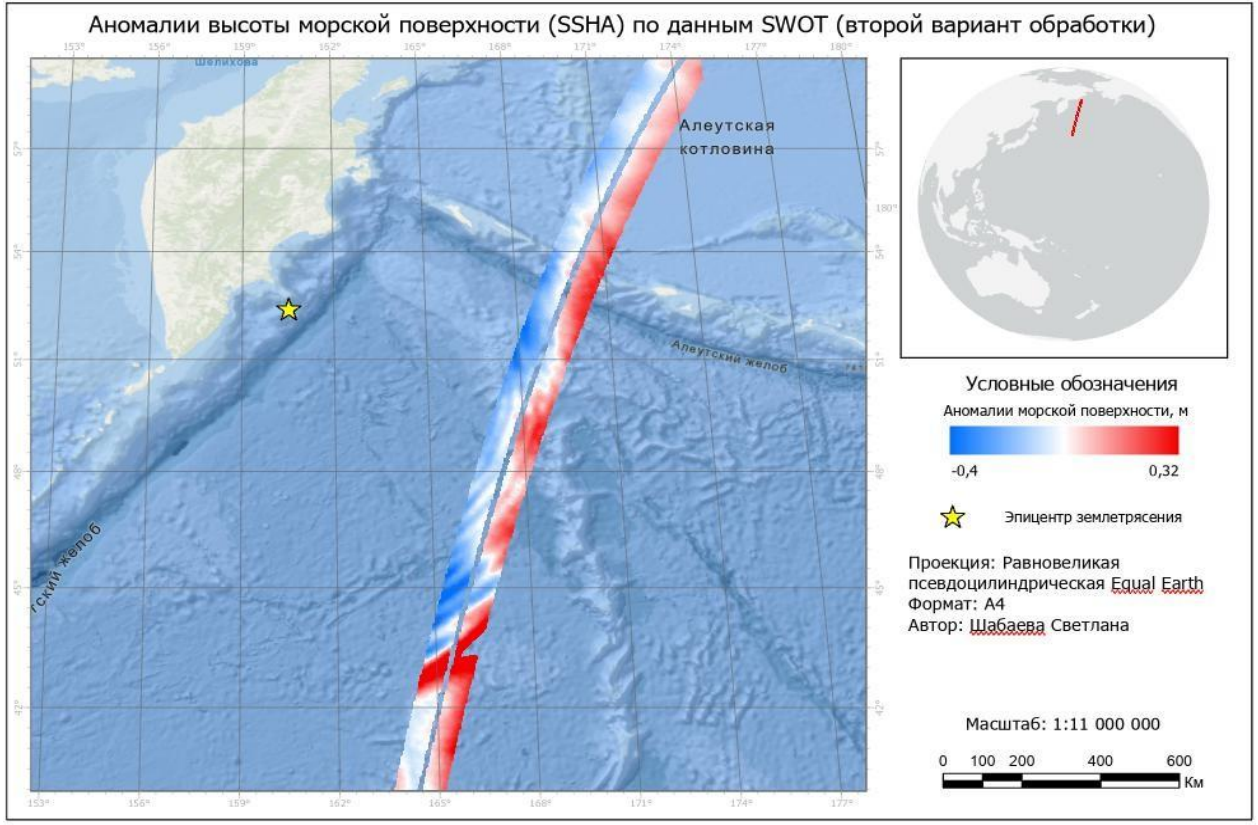
- **SWOT**: миссия запущена в декабре 2022 года, научные наблюдения начались в 2023 году.
- **DART**: сеть глубоководных станций действует с 2000 года; наблюдения доступны в виде временных рядов с отдельных станций.
- **Особенность данных**: SWOT обеспечивает пространственную съёмку поверхности океана, DART – временную регистрацию изменений давления на отдельных станциях.

208.000000	2025	7	27	0	0	0	3872.36389	3872.37917	-0.01528	0.000
208.010417	2025	7	27	0	15	0	3872.34243	3872.36216	-0.01974	0.000
208.020833	2025	7	27	0	30	0	3872.32430	3872.34744	-0.02314	0.000
208.031250	2025	7	27	0	45	0	3872.31020	3872.33468	-0.02448	0.000
208.041667	2025	7	27	1	0	0	3872.29811	3872.32421	-0.02610	0.000
208.052083	2025	7	27	1	15	0	3872.28803	3872.31603	-0.02801	0.000
208.062500	2025	7	27	1	30	0	3872.27862	3872.31014	-0.03153	0.000
208.072917	2025	7	27	1	45	0	3872.27323	3872.30655	-0.03332	0.000
208.083333	2025	7	27	2	0	0	3872.27252	3872.30458	-0.03206	0.000
208.093750	2025	7	27	2	15	0	3872.27116	3872.30524	-0.03408	0.000
208.104167	2025	7	27	2	30	0	3872.27380	3872.30785	-0.03405	0.000
208.114583	2025	7	27	2	45	0	3872.27913	3872.31276	-0.03363	0.000
208.125000	2025	7	27	3	0	0	3872.28714	3872.32029	-0.03314	0.000
208.135417	2025	7	27	3	15	0	3872.29649	3872.32978	-0.03329	0.000
208.145833	2025	7	27	3	30	0	3872.30919	3872.34155	-0.03236	0.000
208.156250	2025	7	27	3	45	0	3872.32256	3872.35497	-0.03241	0.000
208.166667	2025	7	27	4	0	0	3872.33995	3872.37002	-0.03007	0.000

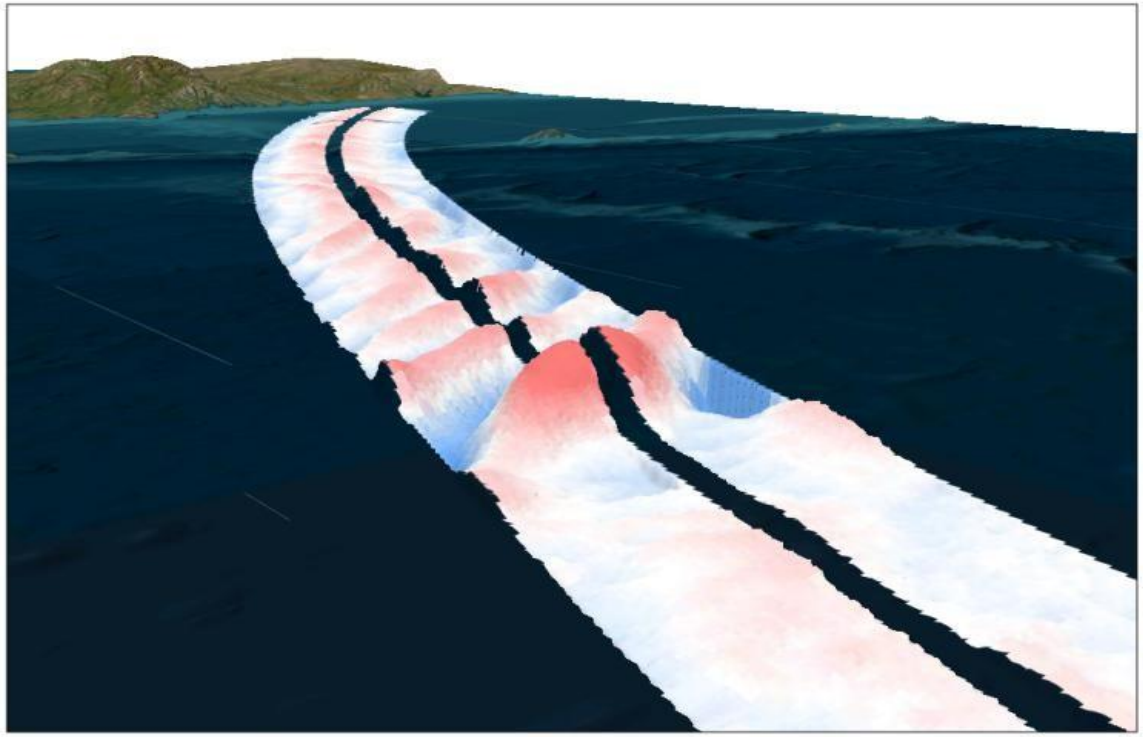
Исходные данные DART для одного буя

Результаты. SWOT

- Запущен 16 декабря 2022 года. Научная фаза наблюдений началась в августе 2023 года.
- Инструмент: Интерферометр KaRIn (Ka-band Radar Interferometer)
- Трек спутника (Pass 267, цикл 36) с аномалиями высоты морской поверхности.
- Максимум **+0.33 м,** минимум: **-0.70 м**
- Направление волны (на юго-восток)
- Полная пространственно-временная геометрия цунами
- Обнаружение дисперсионной структуры волны



Результаты. SWOT



Трехмерный вид волны с вертикальным увеличением.

Результаты. DART

Первые станции NOAA были развернуты в 2000 году. Сейчас глобальная сеть включает более 60 станций разных стран.

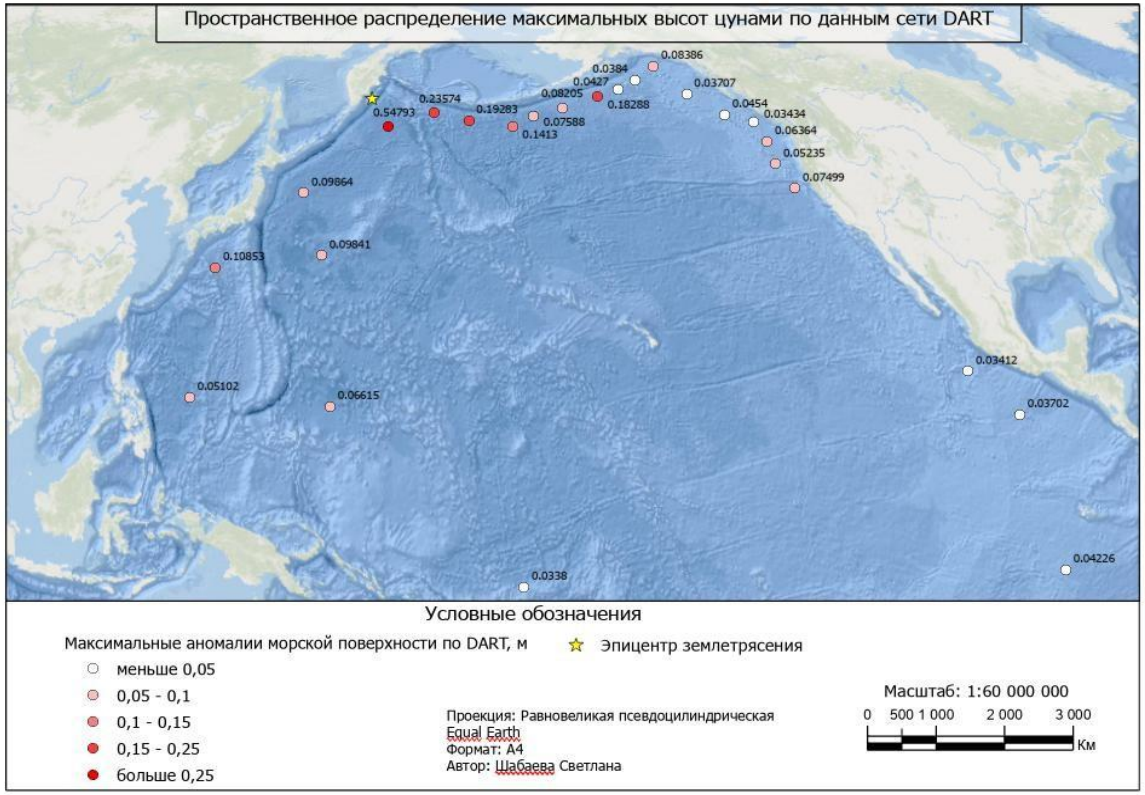
25 глубоководных станций DART зарегистрировали прохождение цунами по всему Тихому океану

Максимальная зафиксированная высота (ближняя зона): +0.55 м (Камчатка)

Минимальная зафиксированная высота (удаленная зона): +0.03 м (Самоа)

Сеть DART создала набор измерительных приборов на пути цунами, позволив проследить **эволюцию волны в пространстве и времени** - от момента зарождения до затухания на противоположном берегу океана.

Высота волны закономерно убывает с удалением от эпицентра, но с **важной аномалией**



Пространственное распределение максимальных высот цунами по данным сети DART, м

Результаты. DART

Станция у берегов Японии (21413, расстояние 2500 км) зафиксировала максимум **через 42 минуты** после землетрясения, тогда как более близкая станция у Алеутской гряды (21415, расстояние 900 км) - только **через 70 минут**.

Расстояние до Японии больше в **2.8 раза**

Но волна пришла **на 28 минут раньше**

Почему так произошло?

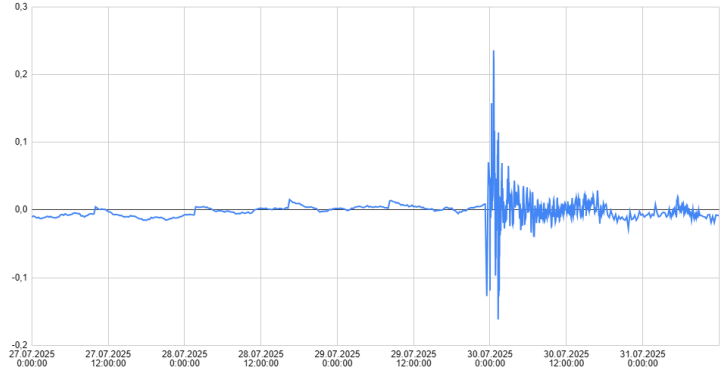
Подводные горы Император - цепь протяженностью ~2000 км, высота пиков до 4-5 км

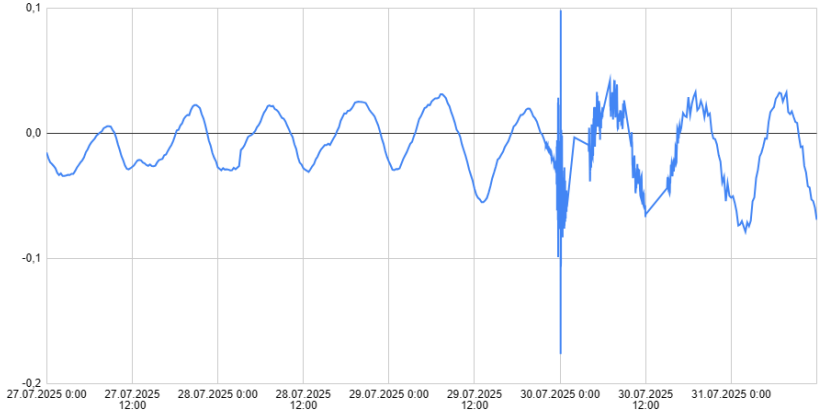
Волны цунами, обрушиваясь на горы, **частично отражаются**

Горы заставляют волны **огибать препятствия** с разных сторон

Создается **сложная интерференционная картина**

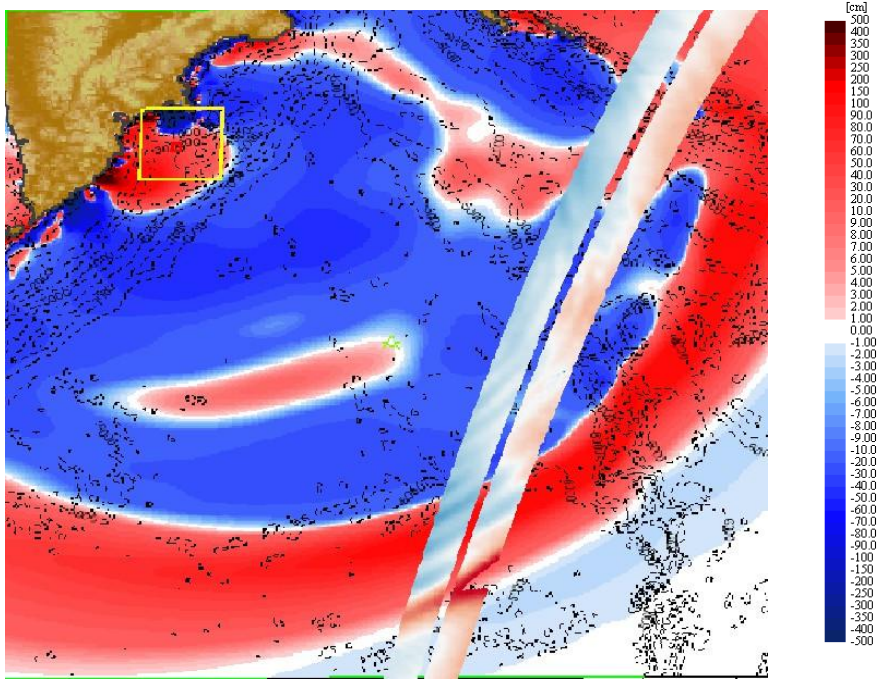
Временной ряд станции DART 21415 (Алеутские о-ва)





Временной ряд станции DART 21413 (Япония)

Моделирование в ComMIT



Сопоставление модельного прогноза и реальных данных SWOT через 70 минут после главного афтершока землетрясения.

Моделирование распространения максимальных значений аномалий в программе ComMIT

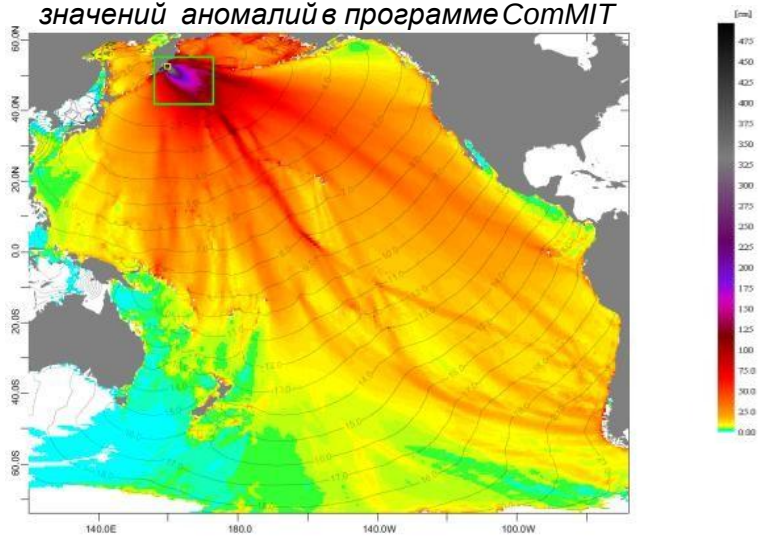
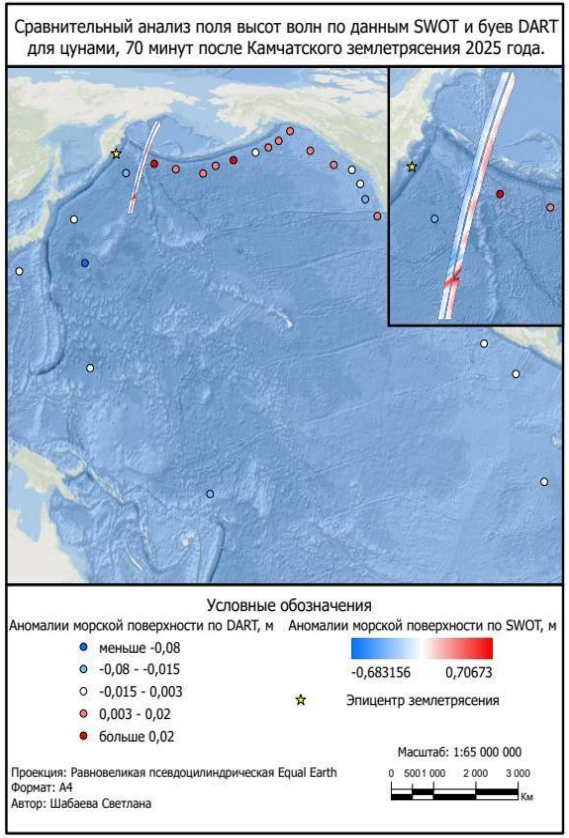


Таблица сравнения модели ComMIT и данных DART

Станция	DART (реальность)	Модель ComMIT
21415 (Алеуты)	0.23 м	~1.5 м
21413 (Япония)	0.09 м	~0.8 м

Результаты. Сравнение

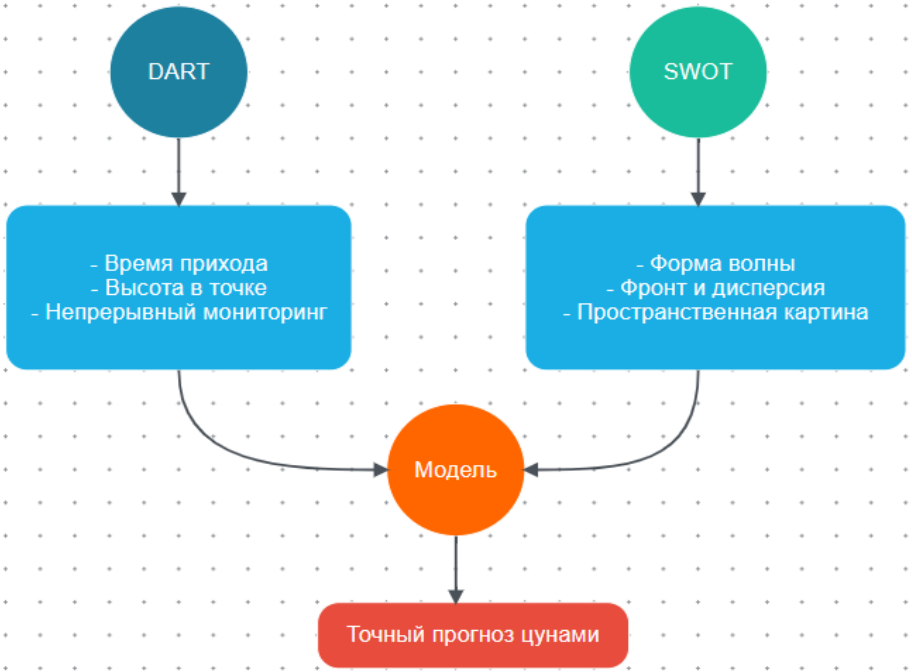
Критерий	SWOT	DART
Тип данных	Дистанционные	Контактные (буи)
Охват	Глобальный, пространственный. 120 км	Глобальная сеть, точечные
Временное разрешение	Ограниченное	Непрерывное
Точность	Несколько см	Меньше 1 мм
Основное преимущество, области применения	Визуализация распространения, показ структуры волны	Точные измерения волн, оперативность, калибровка моделей.
Ограничение	Редкое временное покрытие	Точечный характер измерений.



Пространственное распределение данных SWOT и DART со значениями после 70 минут с начала землетрясения

Выводы

- **SWOT** обеспечивает детальную пространственную визуализацию волнового поля цунами, позволяя выявлять его структуру и дисперсионные особенности.
- **DART** обеспечивает непрерывную регистрацию изменений давления в глубоководной среде и остаётся важнейшим источником данных для оперативного обнаружения цунами.
- **ComMIT** позволяет моделировать распространение цунами и сопоставлять расчетные характеристики с фактическими наблюдениями.
- **SWOT не заменяет DART** и существующие системы оповещения о цунами, поскольку спутниковые наблюдения ограничены временем пролета и не обеспечивают непрерывного контроля.
- Наибольшие возможности мониторинга обеспечивает **интеграция** спутниковых, глубоководных и сейсмологических наблюдений с численным моделированием.




ВЫСШАЯ • ШКОЛА • ЭКОНОМИКИ •