

Исследования арктического шельфа: современные проблемы и решения

Тихоцкий Сергей

tikhotskii.sa@mipt.ru

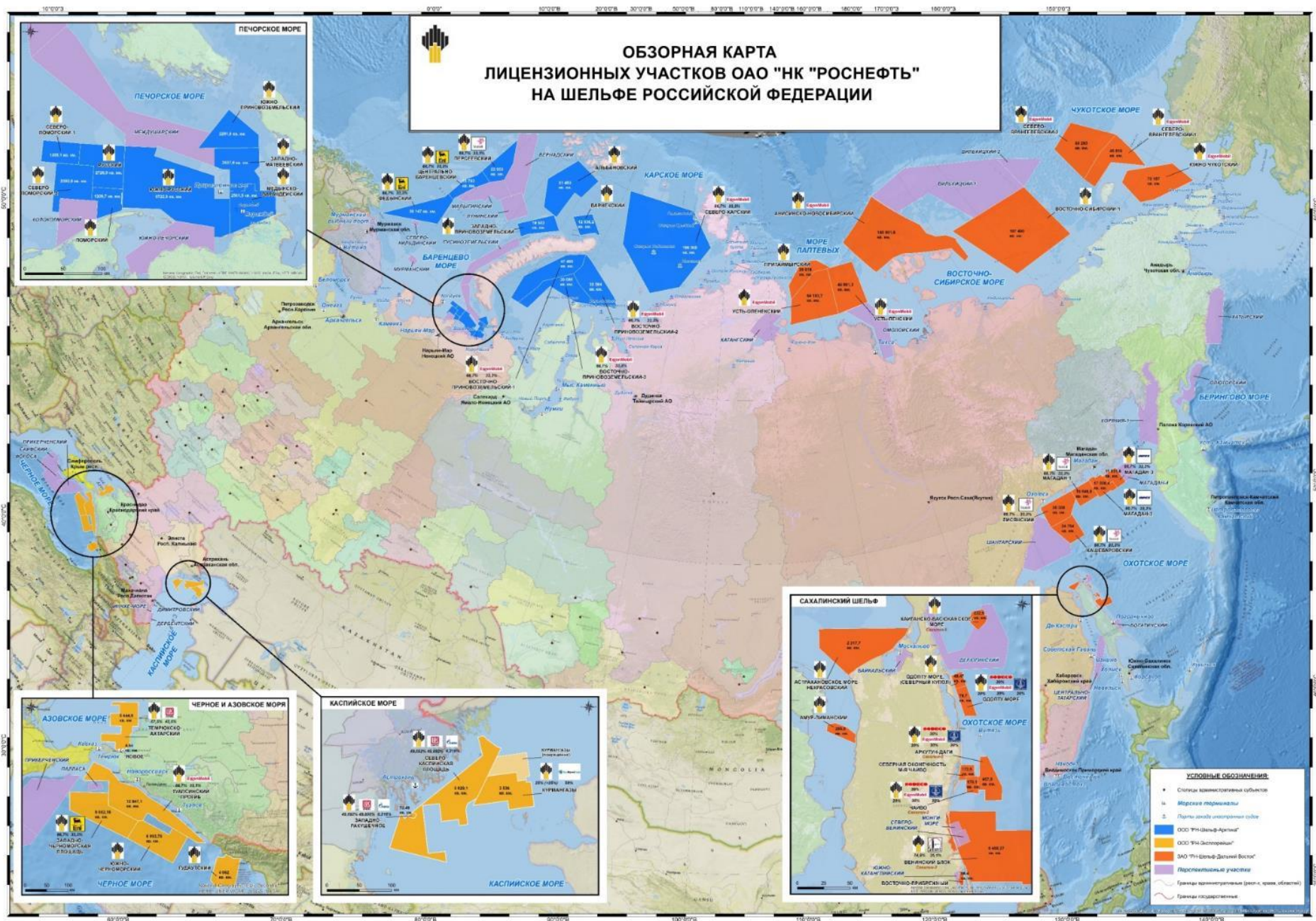


РНФ
Российский
научный фонд



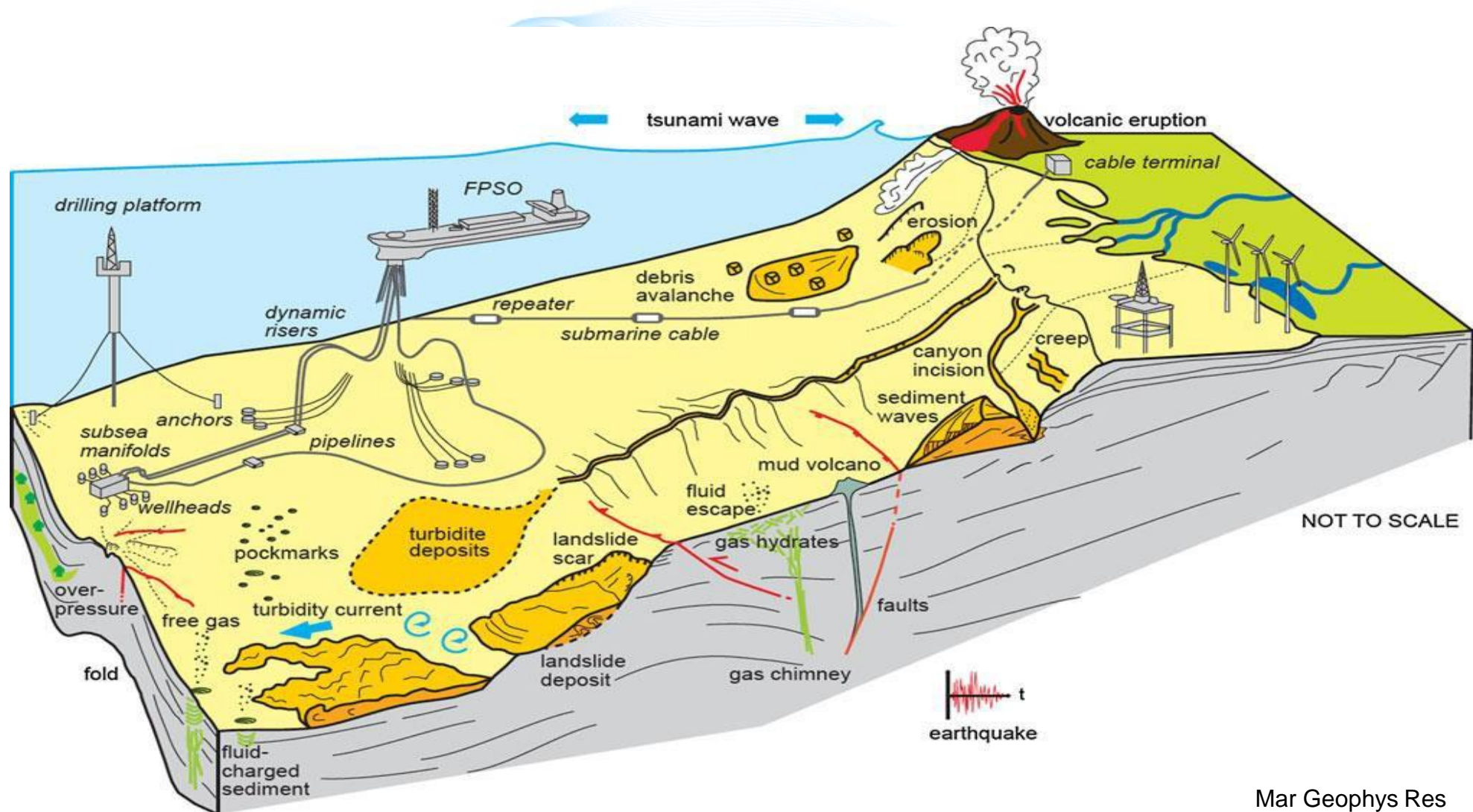
300 лет
Российской Академии
Наук

II всероссийская школа молодых учёных
Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике
6–9 июня 2022 Московская область



Геологические процессы на шельфе

Опасные геологические процессы



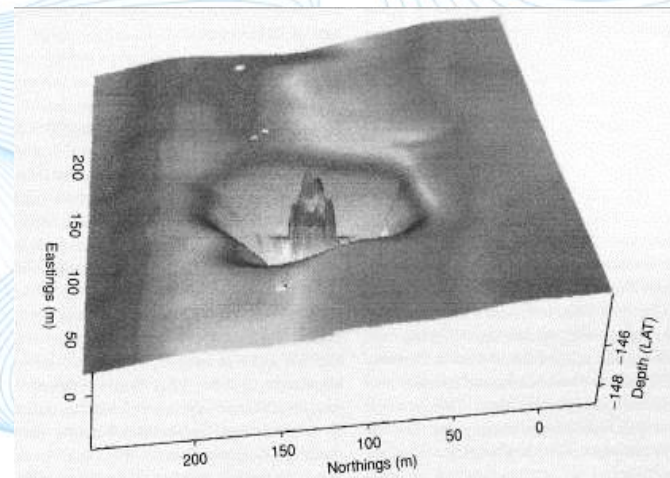
Опасные геологические процессы – выбросы газа из зон АВПД



Гибель буровой платформы в результате выброса газа из газового кармана с АВПД и последующего пожара



Выброс газа на шельфе Норвежского моря вблизи буровой платформы West Vanguard (1985г.)



Траулер, затонувший в 1923 г в центре большой покмаркаи (Северное море)

[Judd A. and Hovland M., 2007]



Фонтанирование скважины (Байдарацкая губа, Карское море, газопровод Бованенково-Ухта)

Геологические процессы на шельфе

катастрофа в мексиканском заливе (2010 г.) – следствие плохой цементации скважины и недооценки АВПД



Трейлер к фильму «Глубоководный горизонт» - весьма точной реконструкции обстоятельств аварии

Геологические процессы на шельфе

катастрофа в мексиканском заливе (2010 г.) – следствие плохой цементации скважины и недооценки АВПД

Погибло 13 человек

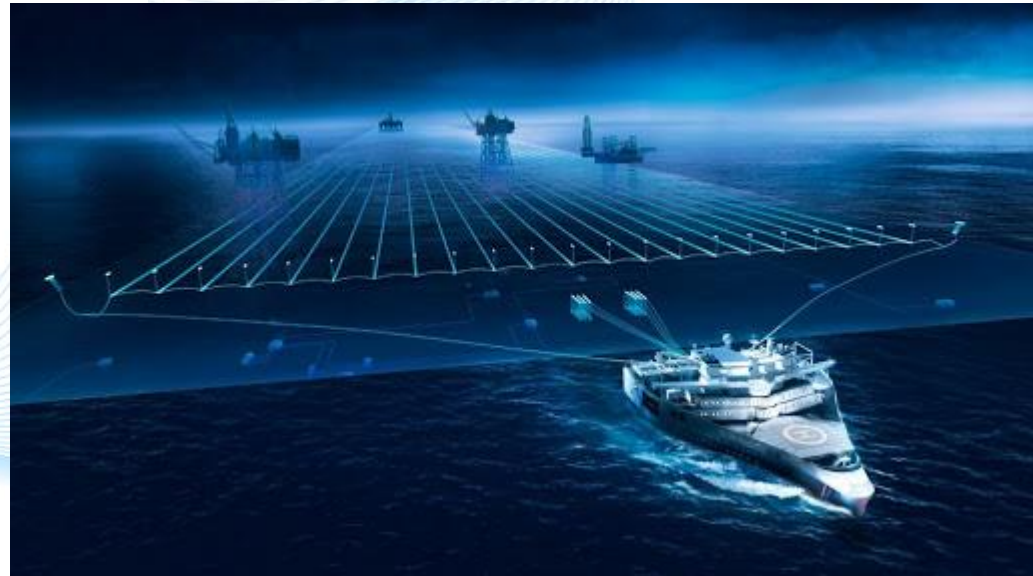
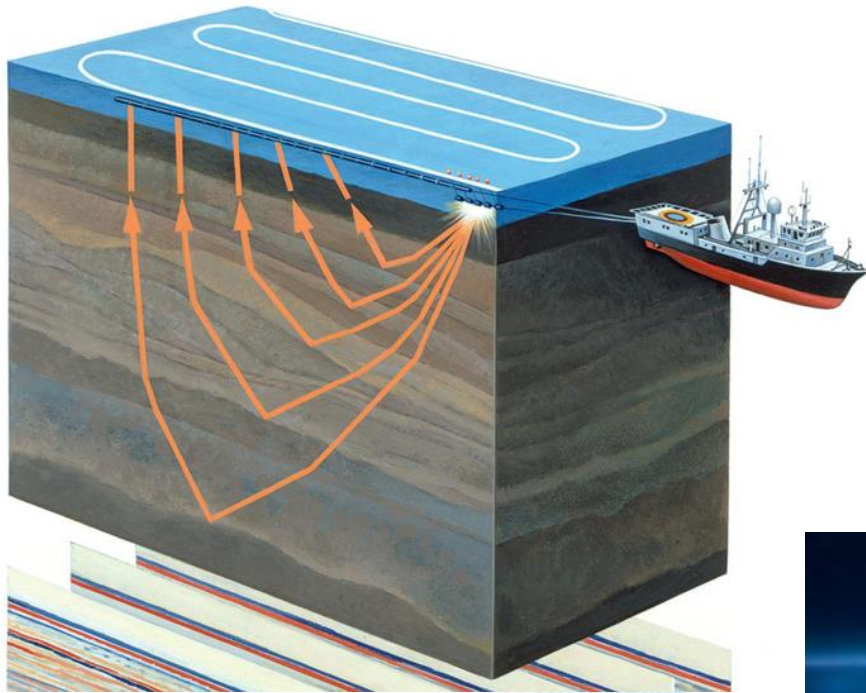
- Разлив нефти продолжался 152 дня с 20 апреля по 19 сентября 2010 года, за это время из скважины в Мексиканский залив вытекло около 5 миллионов баррелей нефти
- Нефтяное пятно достигло площади 75 тысяч квадратных километров
- В результате разлива нефти было загрязнено 1770 километров побережья, был введён запрет на рыбную ловлю, для промысла были закрыты более трети всей акватории Мексиканского залива
- По состоянию на 2 ноября 2010 года было собрано 6814 мёртвых животных, в том числе 6104 птицы, 609 морских черепах, 100 дельфинов и других млекопитающих, и одна рептилия другого вида
- Причинами были названы: **недостаток информации**, неудачная конструкция скважины, недостаточное цементирование, изменения в проекте



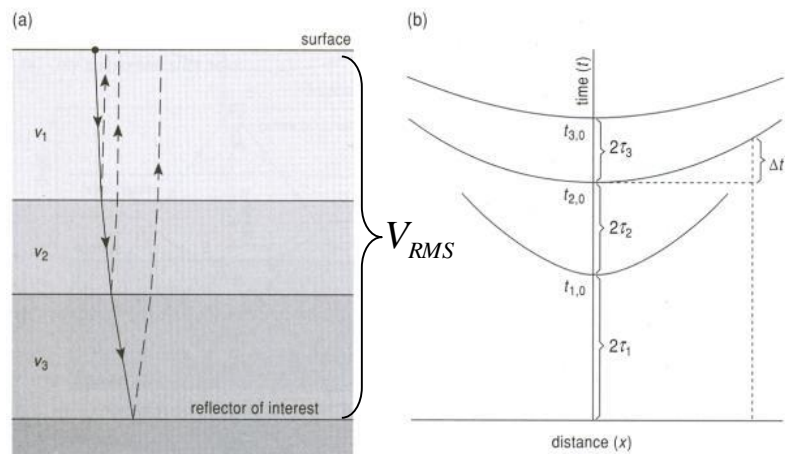
Цели исследований шельфа:

1. Геофизическая разведка и мониторинг разработки месторождений полезных ископаемых
2. Изучение физико-механических свойств пород шельфа и локализация потенциально опасных участков при проектировании и строительстве объектов шельфовой инфраструктуры, включая бурение
3. Моделирование объектов шельфовой инфраструктуры во взаимодействии со средой при различных воздействиях (ветроволновое, ледовое, сейсмическое)

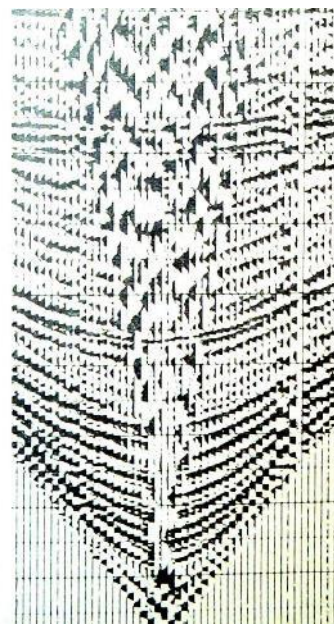
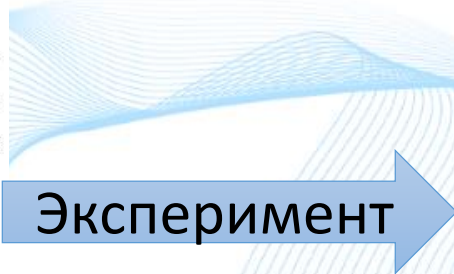
Сейсморазведка: принцип



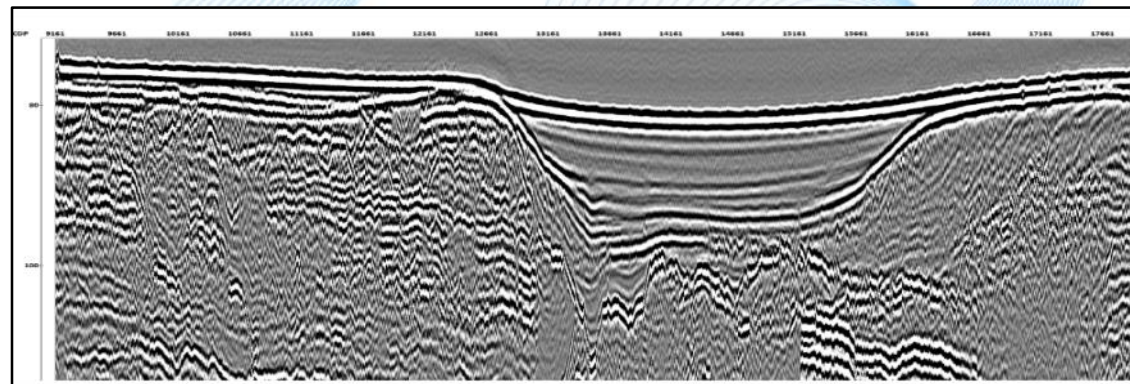
Сейсморазведка: принцип



Формирование отражений (модель)



Сейсмограмма ОГТ



Сейсмический разрез

Сейсморазведка: эксперимент

Источники сейсмических волн:



НИС «Профессор Зенкевич»



«Спаркер»: 100-1000 Гц



«Бумер»: 1-2,5 кГц



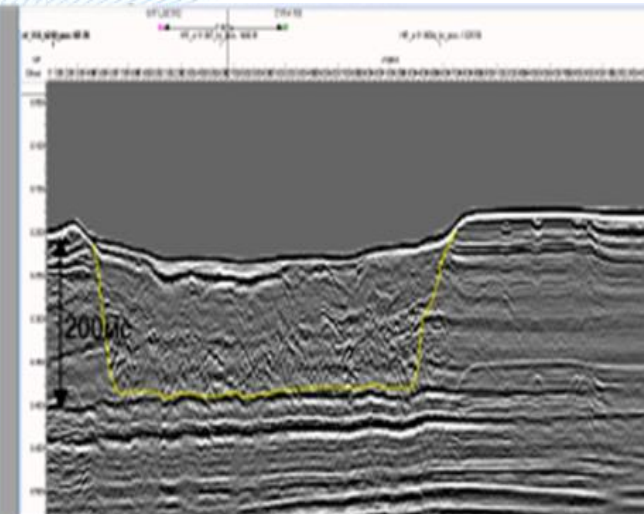
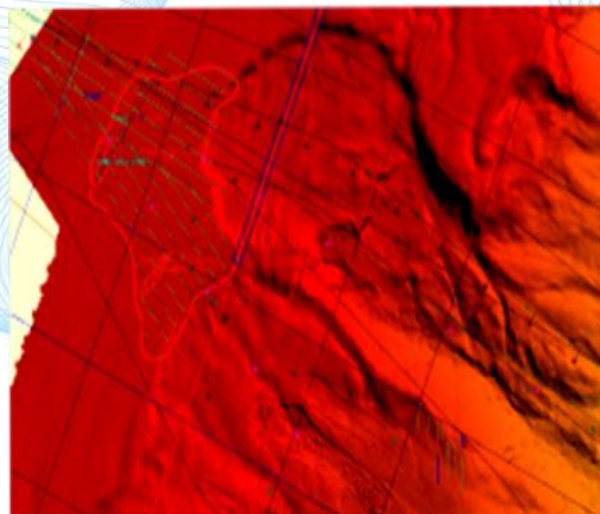
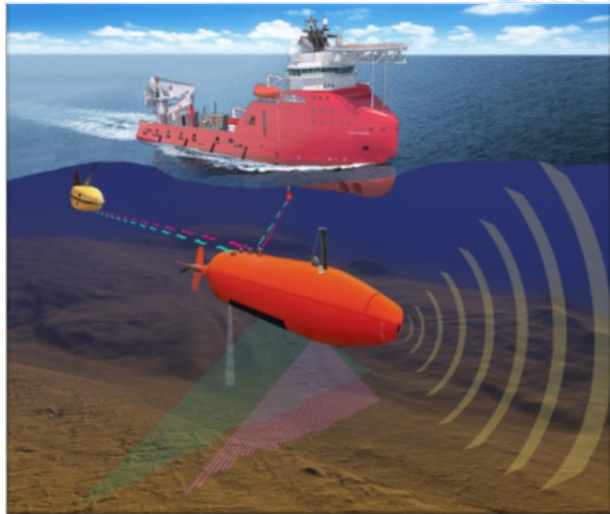
Рабочее место оператора



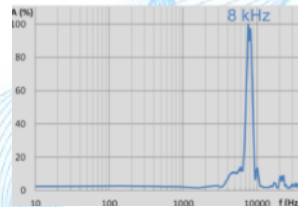
Сейсмическая коса
(пьезоэлектрические приёмники)

Терминология: сейсмические исследования

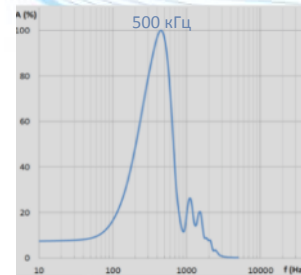
Методика сейсморазведки	Методика сейсморазведки (Англ)	Центральная частота	Диапазон частот	Глубинность	Вертикальная разрешающая способность
СР Сейсморазведка	Conventional seismic	50 Гц	30-75 Гц	До 7 км	7.5 м
СВР Сейсморазведка высокого разрешения	HR High resolution seismic	250 Гц	80-375 Гц	До 1500 м	1.5 м
ССВР Сейсморазведка сверхвысокого разрешения	VHR Very high resolution seismic	750 Гц	375-1500 Гц	До 100 м	0.5 м
СУВР Сейсморазведка ультравысокого разрешения	UHR Ultra high resolution seismic	1500 Гц и выше	1500-16000 Гц	До 30 м	0.25 м и более детально



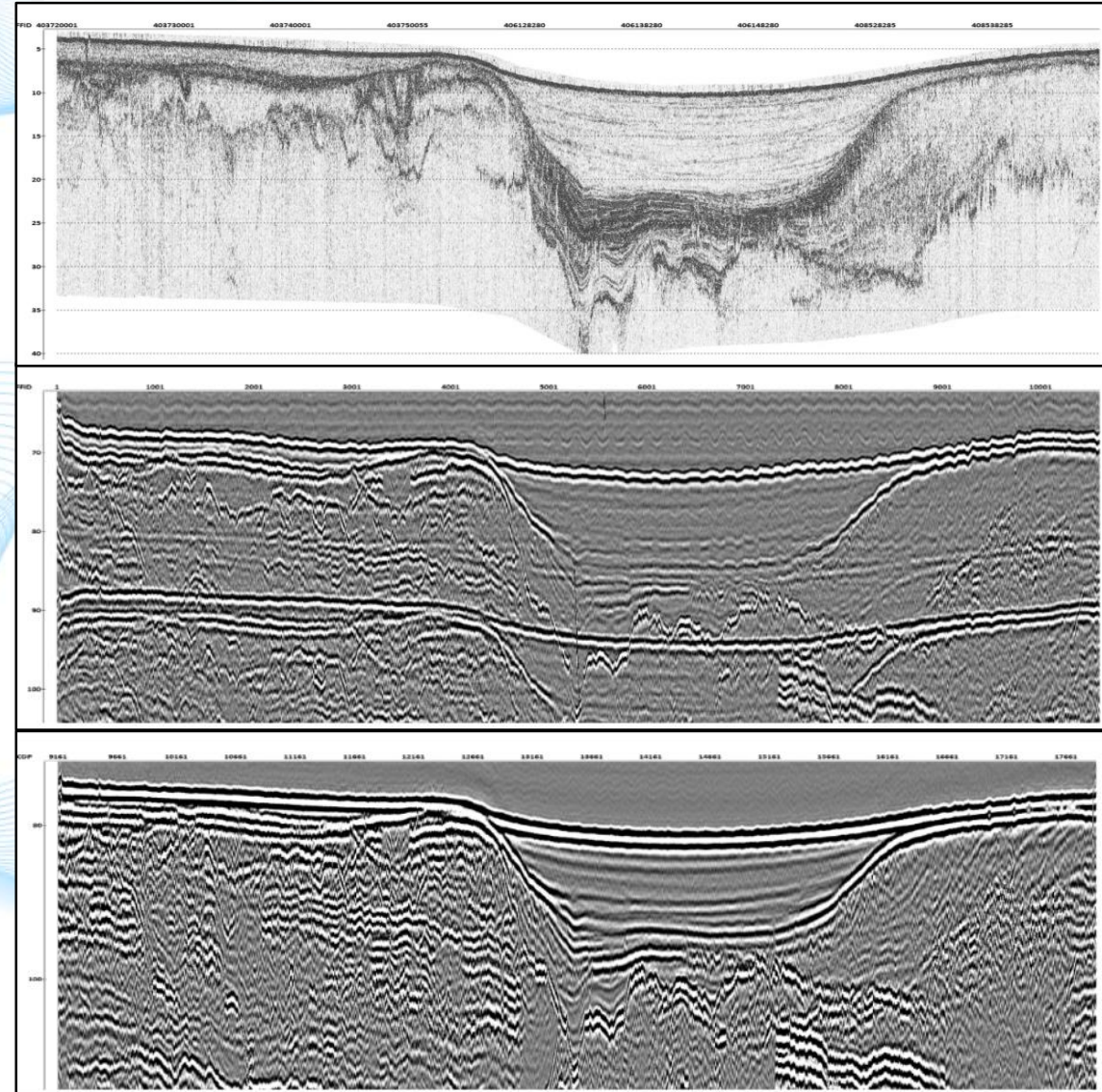
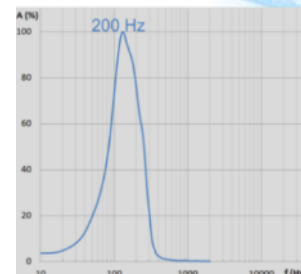
Непрерывное сейсмоакустическое профилирование
Разрешение: 0.5 м
Максимальная глубинность: 20-25 м



Сейсморазведка ультравысокого разрешения
Разрешение: 1.5-2 м
Максимальная глубинность: 70 м



Сейсморазведка сверхвысокого разрешения
Разрешение: 2 м
Максимальная глубинность: 200 м

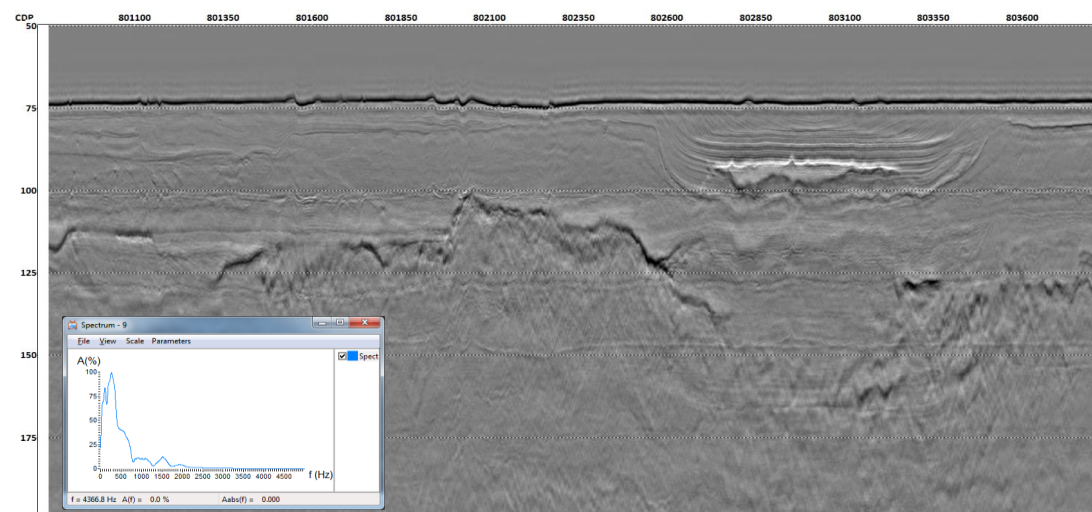
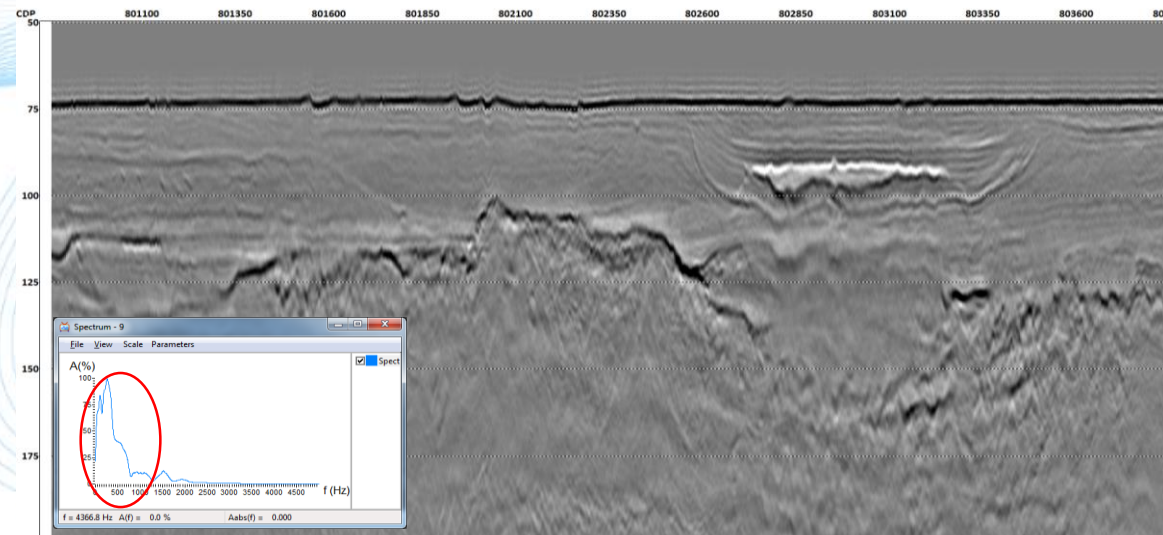
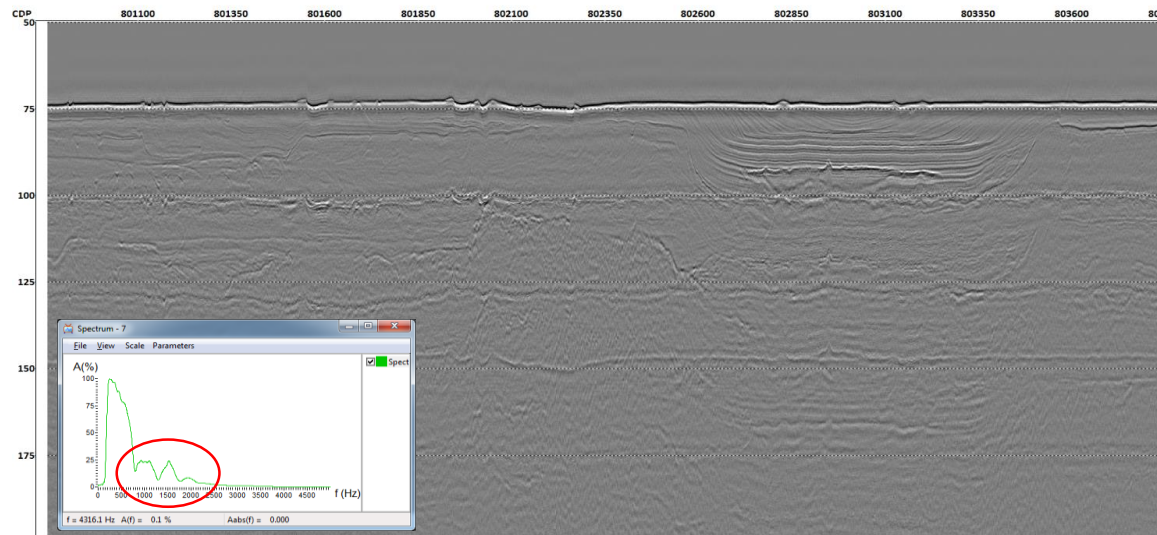


Суммированный разрез

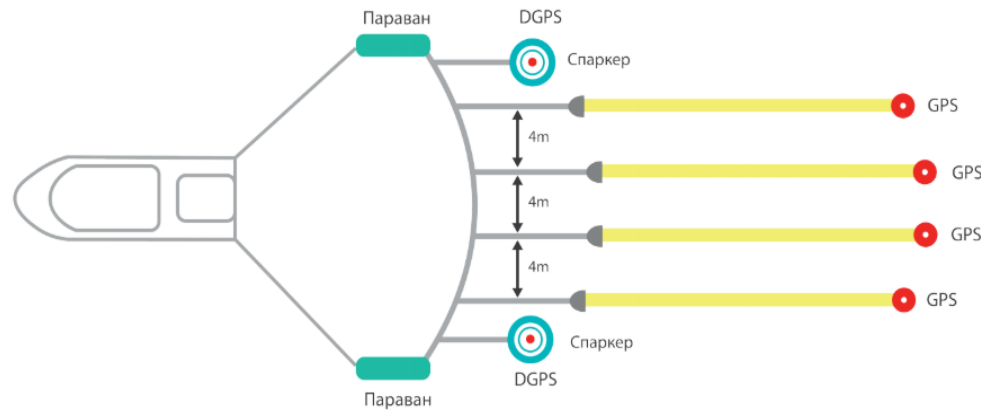
Данные полученные по технологии SplitMultiSeis, Чукотское море

2D ССВР

2D СВР

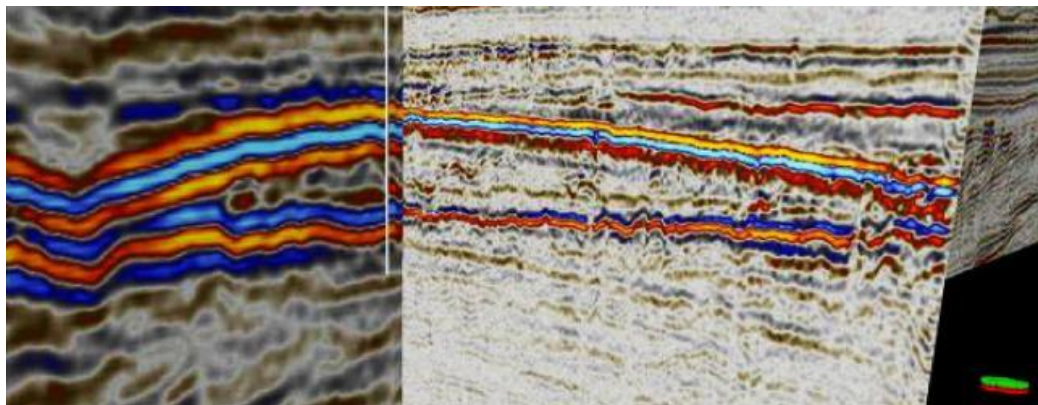


SplitMultiSeis 3D



Источник	
Тип источника	Электроискровой
Количество источников	2
Способ стрельбы	Flip-Flop
Количество электродов	400
Энергия накопителя, Дж	2500
Заглубление, м	0.75
Центральная частота, Гц	600
Интервал ПВ, м	2
Приемные устройства	
Количество кос	4
Количество каналов в косе	16
Интервал ПП, м	2
Расстояние между косами, м	4
Минимальное удаление, м	2
Максимальное удаление, м	32
Параметры съемки	
Расстояние между линиями, м	10-12
Размер бина, м	1x2
Точность позиционирования, м	0.1 - 0.3

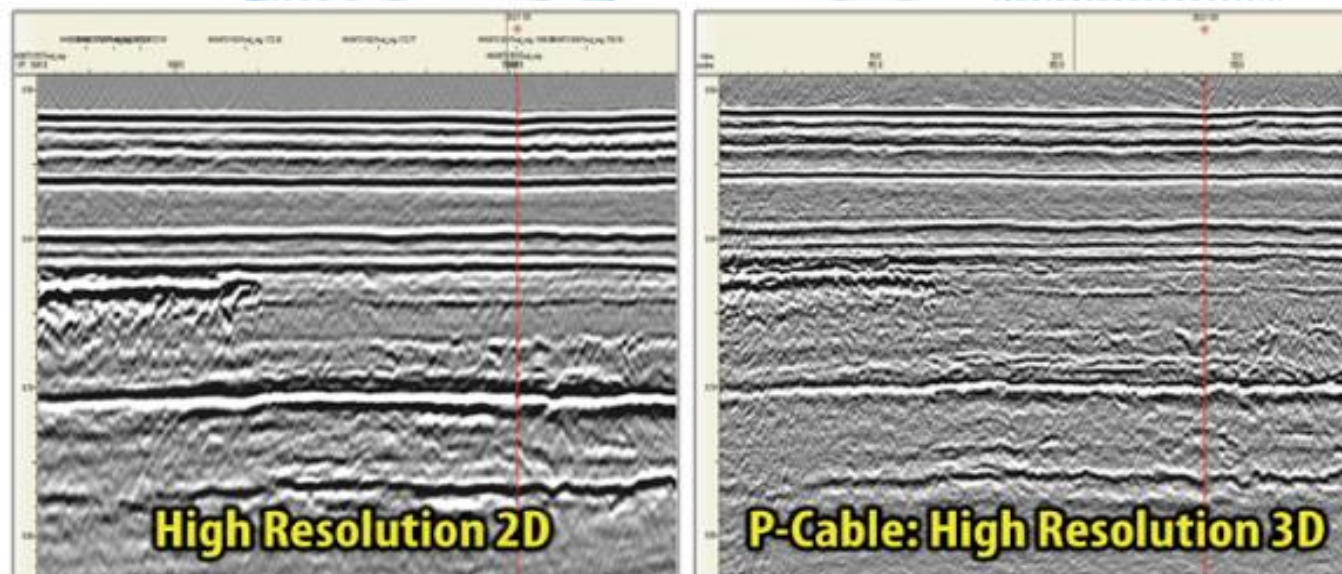
Преимущество 3D над 2D: разрешающая способность



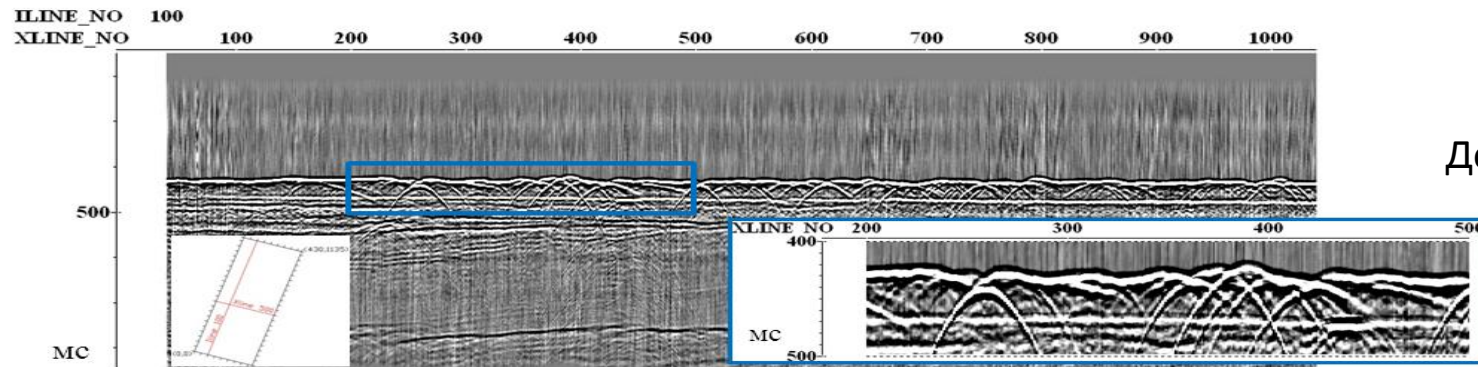
Сравнение промышленной съёмки 3D и данных P-Cable 3D



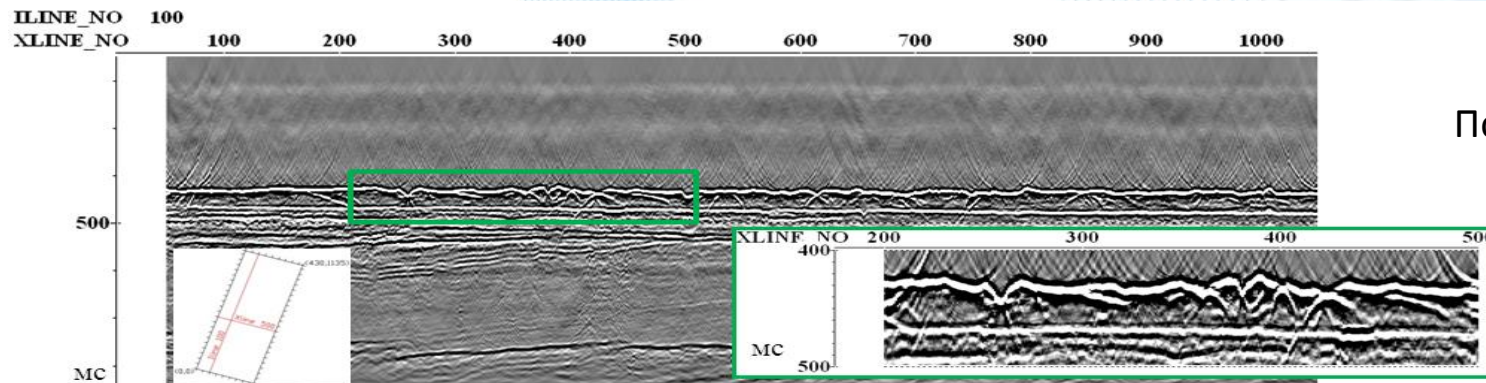
Преимущества 3D-миграции



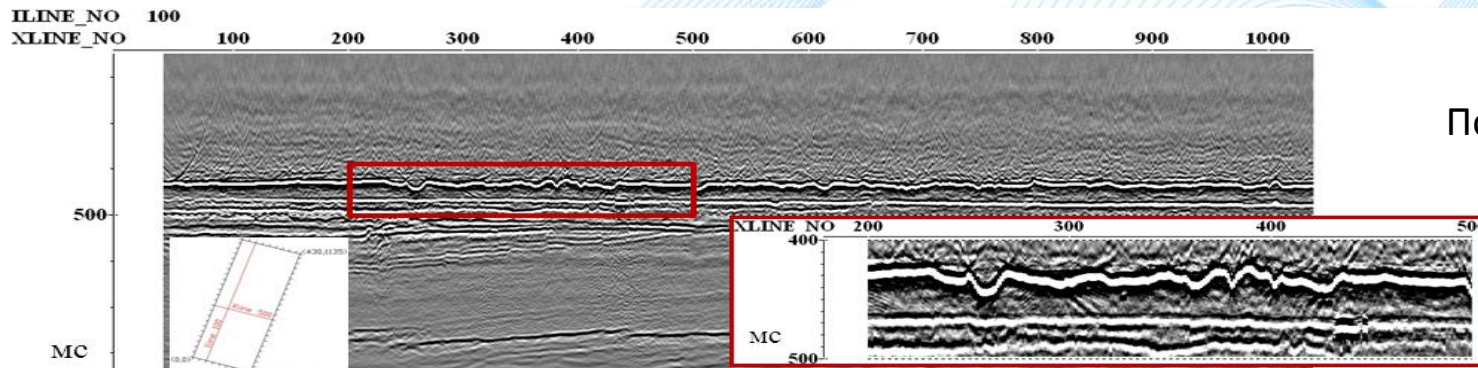
Преимущество 3D над 2D: горизонтальная разрешающая способность



До миграции



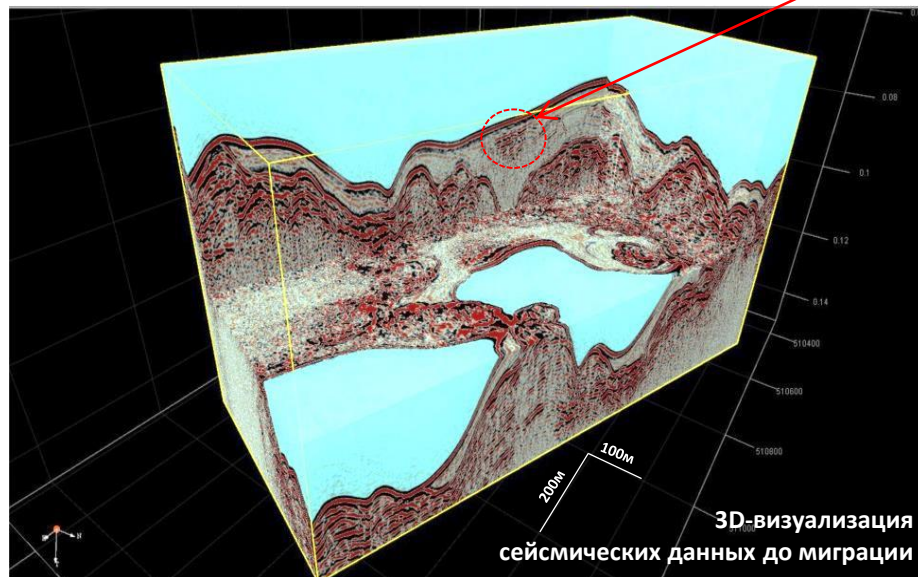
После 2D миграции



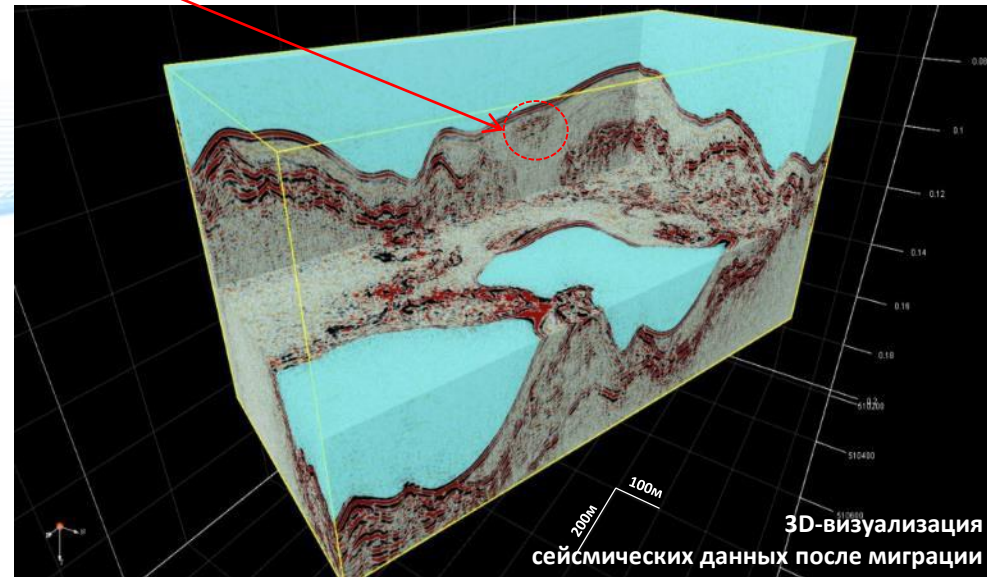
После 3D миграции

Результаты 3D ССВР

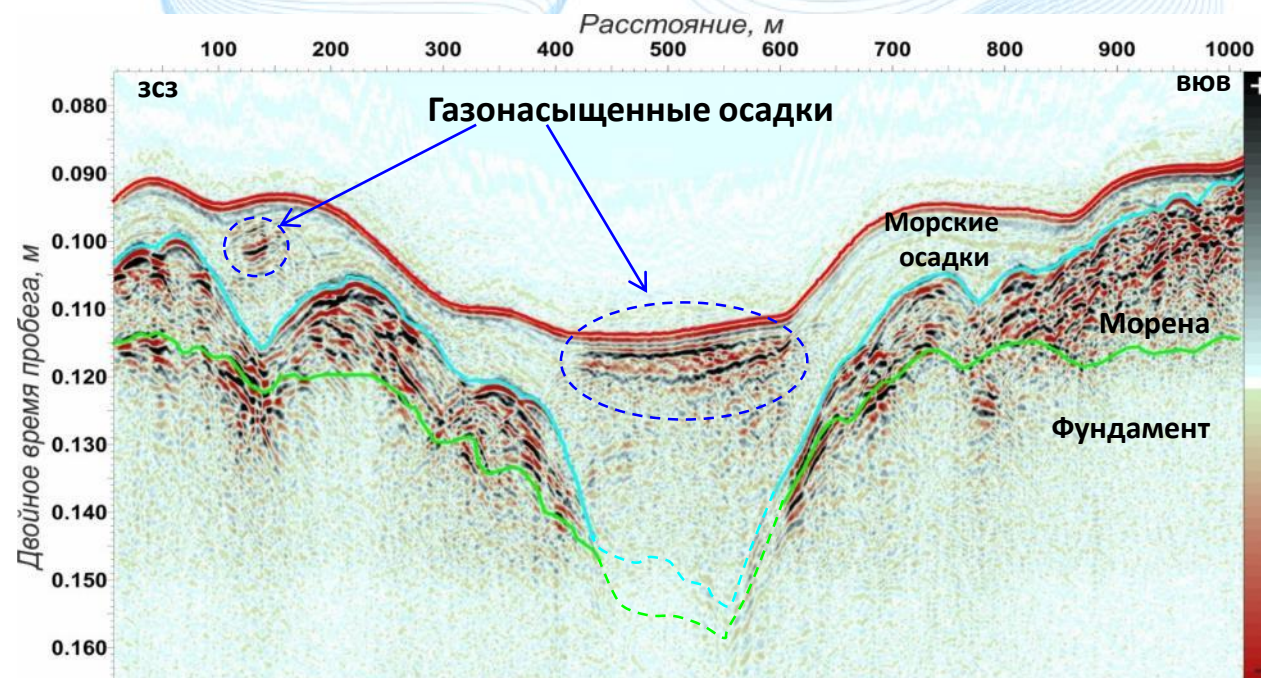
Газонасыщенные осадки

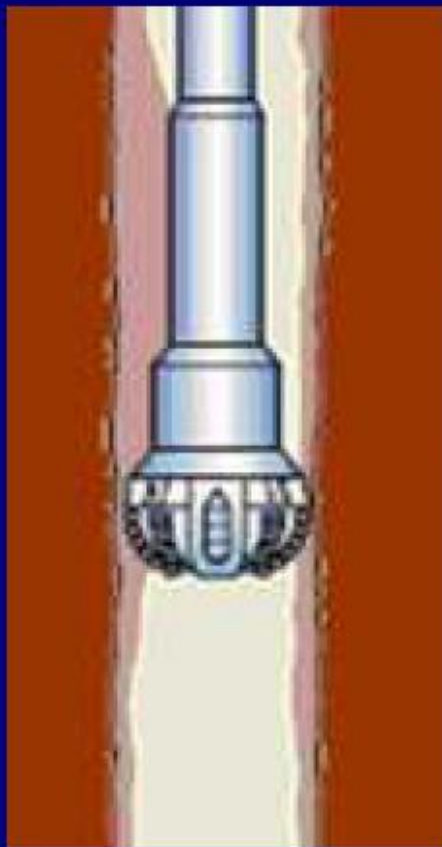


3D-визуализация сейсмических данных до миграции

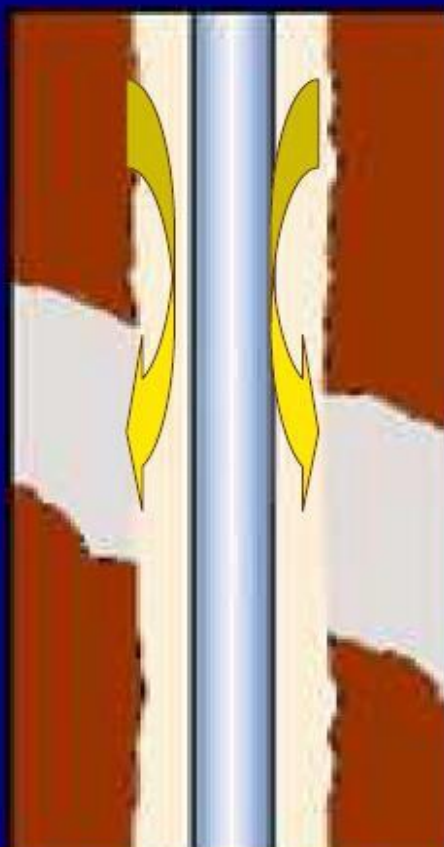


3D-визуализация сейсмических данных после миграции

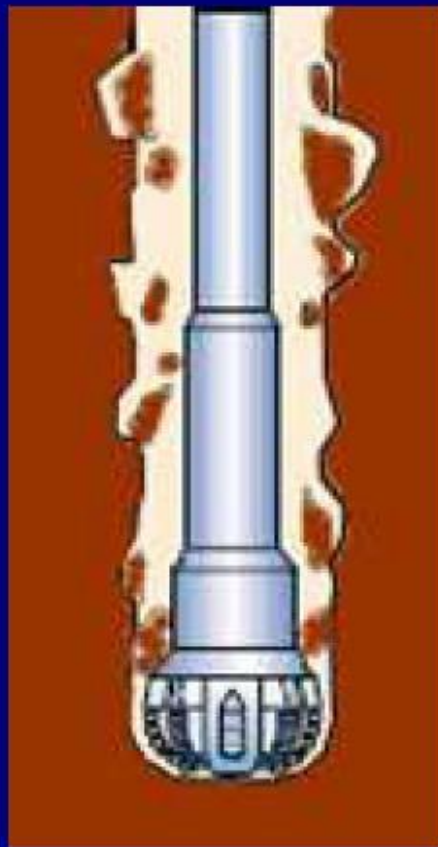




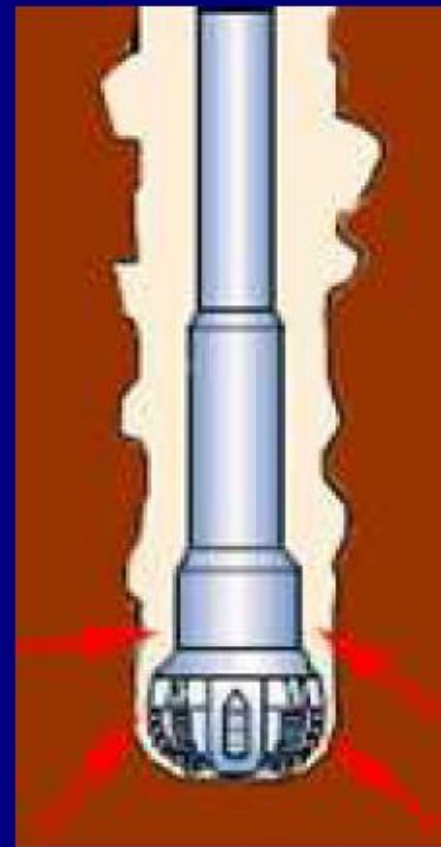
Дифференциальный прихват



Потеря Циркуляции БР

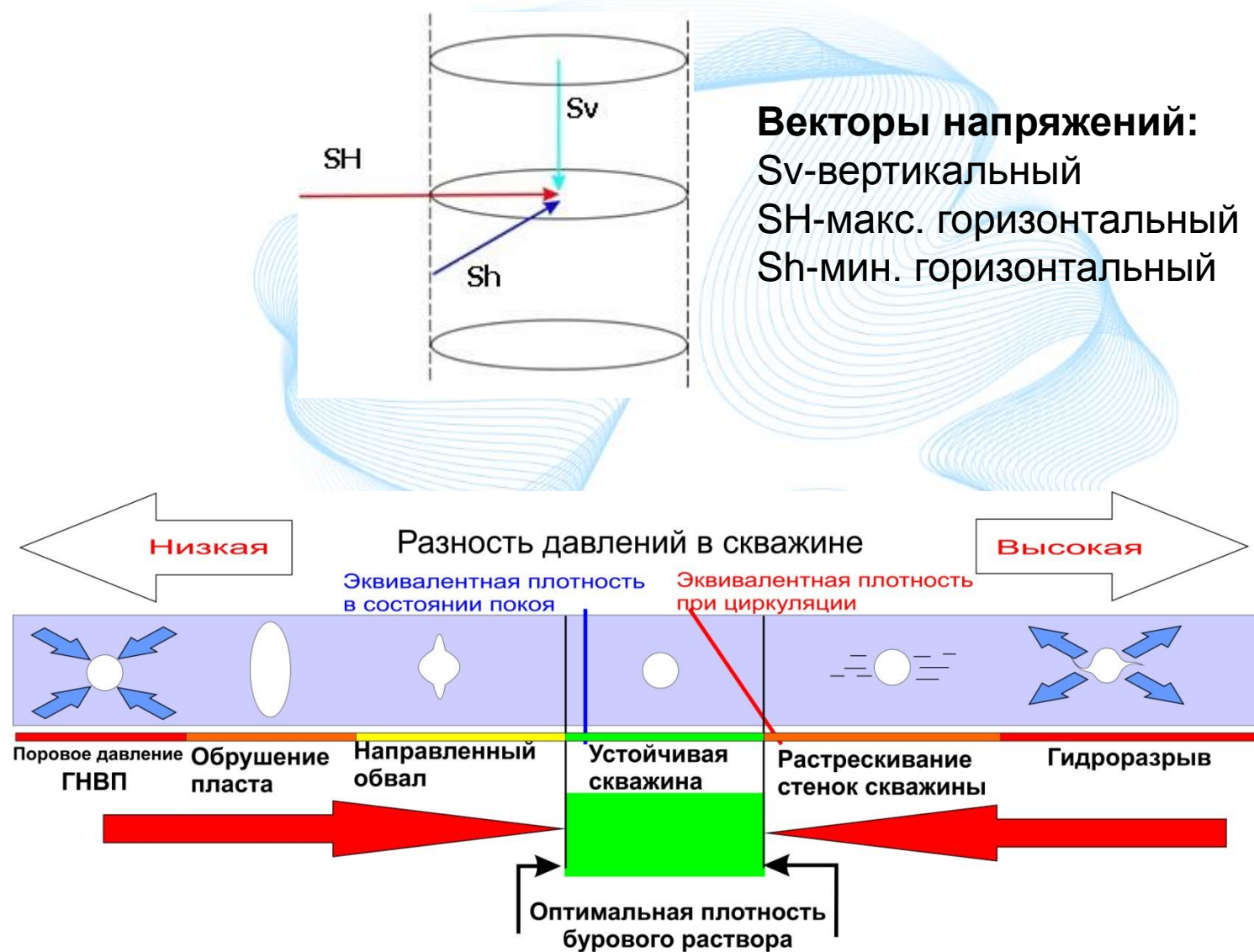


Обрушение ствола

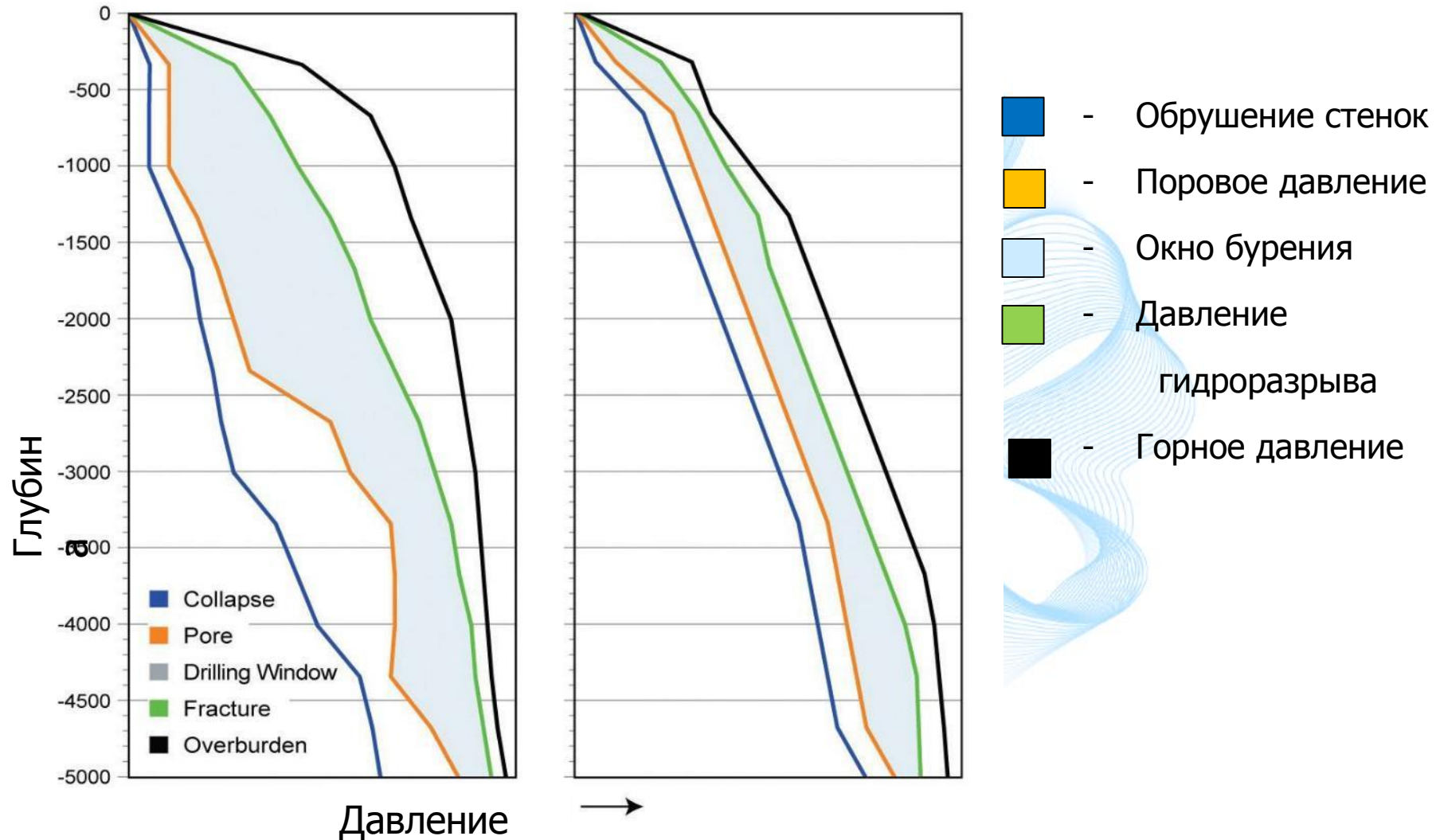


Выбросы пластовых флюидов

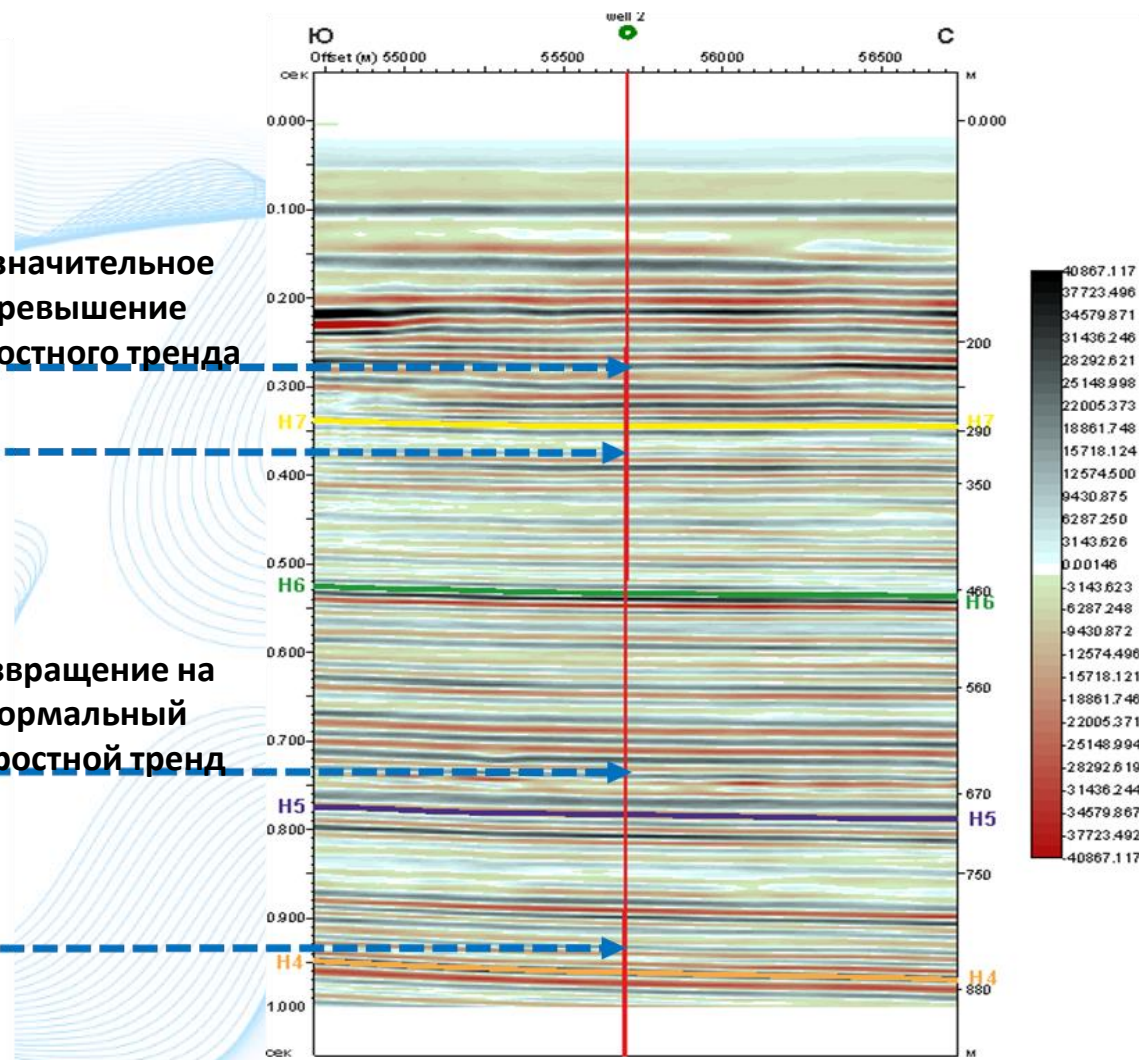
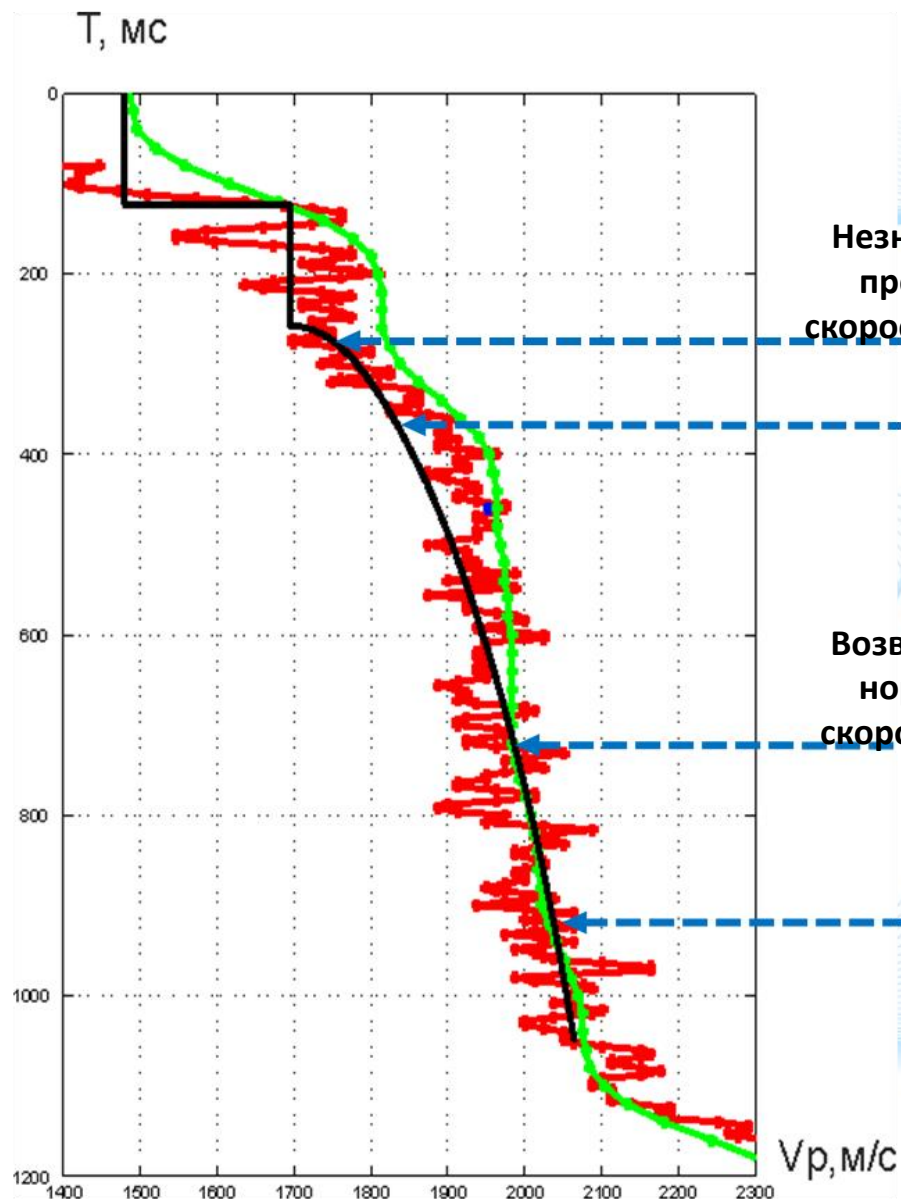
ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЙ СРЕДЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТВОЛА СКВАЖИНЫ



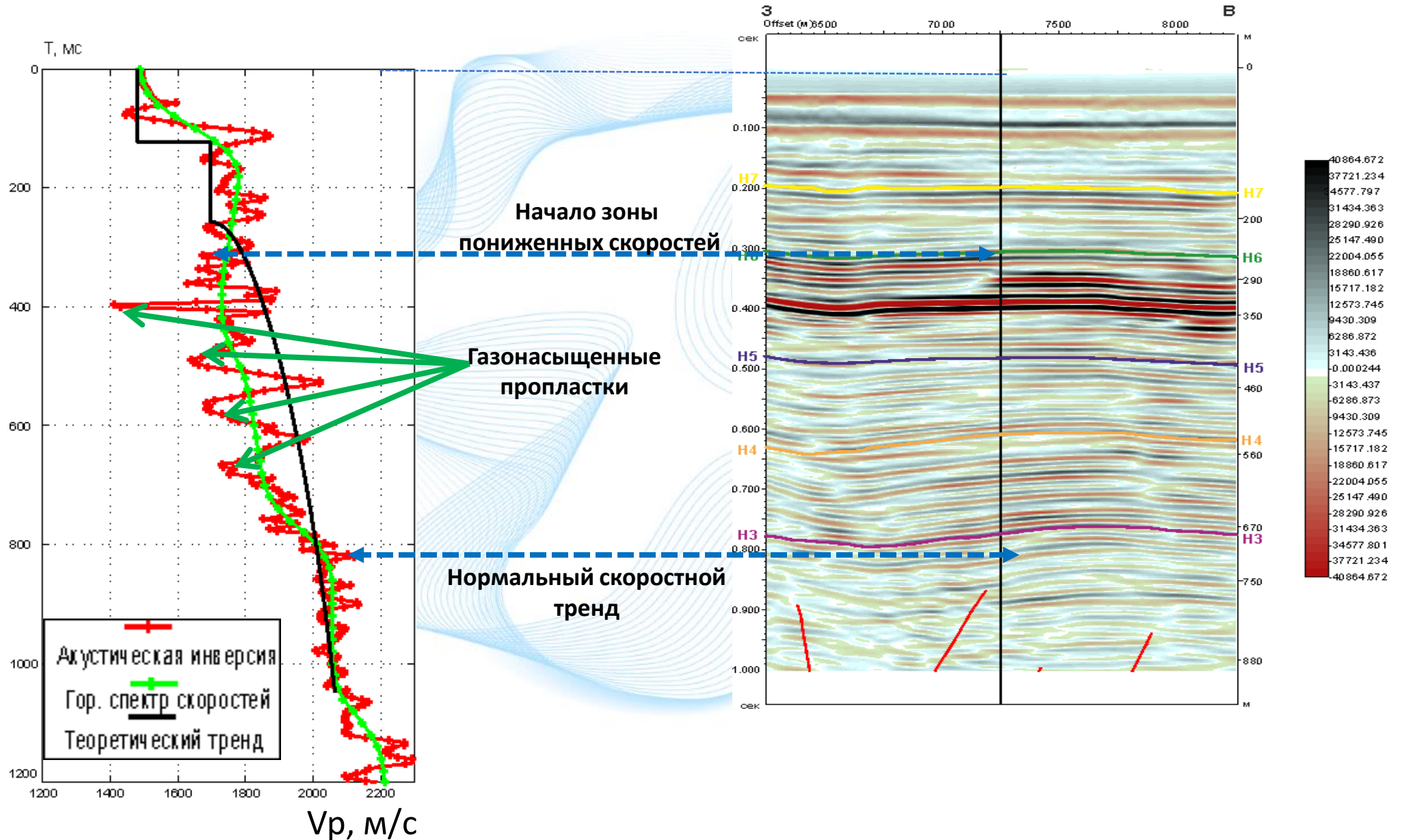
Окно безопасного бурения и факторы риска



Выявление потенциальных интервалов АВПД по данным 3D сейсморазведки



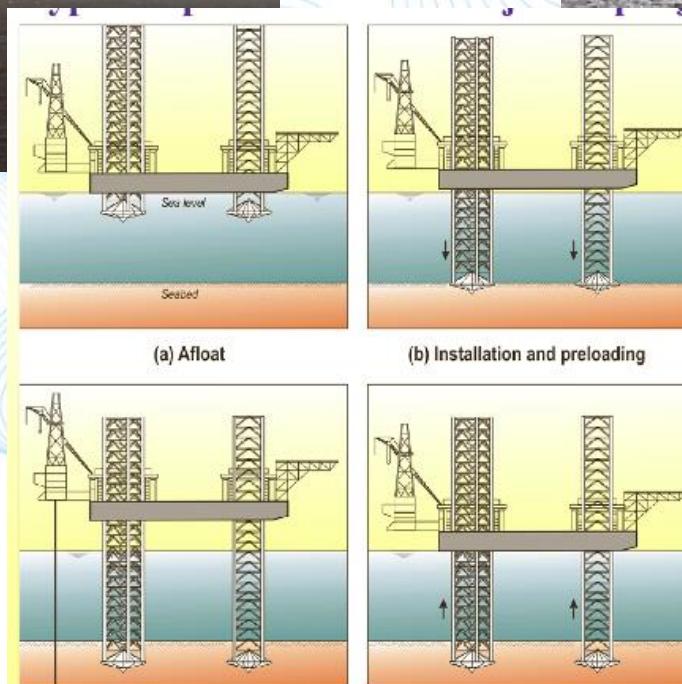
Выявление потенциальных интервалов АВПД по данным 3D сейсморазведки

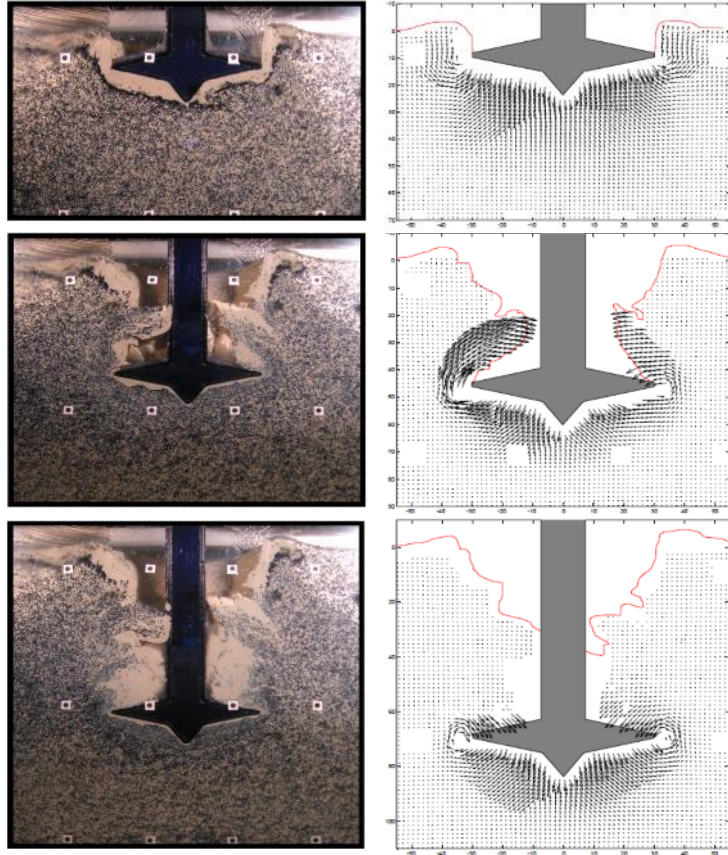


Самоподъёмные буровые установки



СРБУ





Физическое моделирование
(Hossain et al., 2004)

Инженерные подходы

- Расчет смещений основания или силы его предельного сопротивления
- Использование инженерных формул, учитывающих размер и форму опоры, несущую способность, сцепление и вес донных отложений

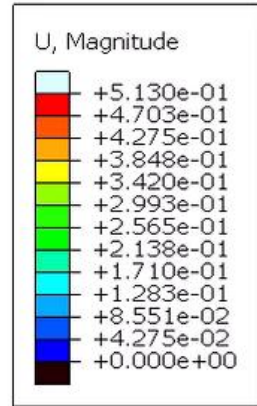
Недостатки: использование эмпирических формул, приближённое решение

Математическое моделирование

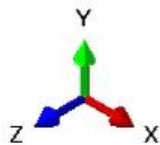
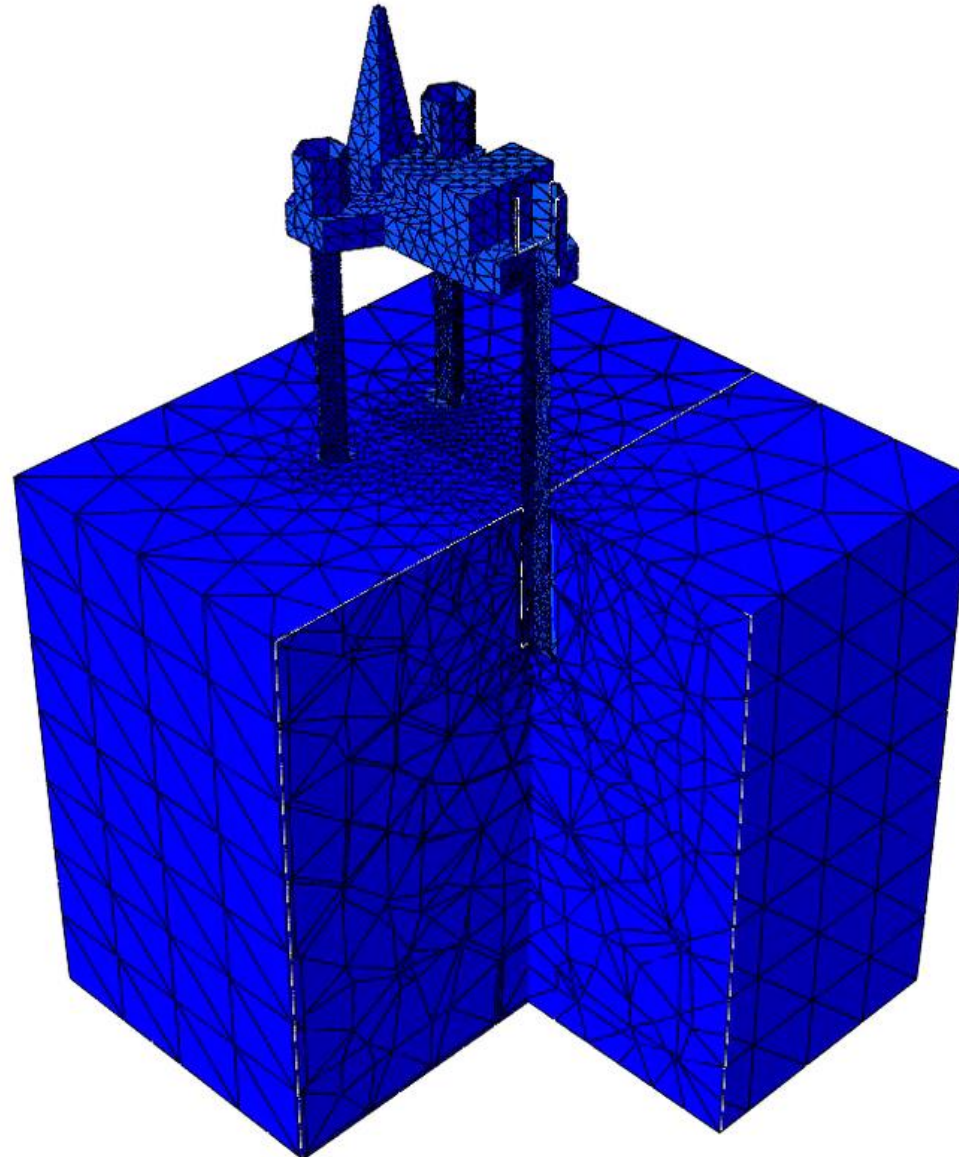
- Расчет полей напряжений и деформаций грунта в окрестности опоры
- Решение уравнений механики твёрдого тела с учетом конкретной вязко-упруго-пластической реологии донных отложений

Сложность: требовательность к вычислительной мощности, сложность определения реологических свойств грунтов

Моделирование поведения СПБУ при сейсмическом воздействии



Step: Step-2 Frame: 14
Total Time: 18.525782



Сейсмические регистрирующие системы для сейсморазведки и мониторинга: модульные и гибридного типа, а также - с использованием датчиков на основе оптического волокна

Ключевые инновационные технологии, созданные в МФТИ:

- Оптоволоконные сенсоры физических величин
 - Распределённые сенсоры на принципе обратного рассеяния (DAS, DTS)
 - Квазираспределённые сенсоры на основе решёток Брэгга и эффекта Фабри-Перро (FBGS)
- Молекулярно-электронные сейсмические датчики (MES)
- Технология передачи мощности по оптоволокну (POF)

Предлагаемые решения на основе перечисленных технологий:

1. Аппаратно-программный комплекс для 4D сейсмического мониторинга и сейсморазведки в транзитной зоне и на предельном мелководье (MES+POF) – УГТ7, **TRL-8**
2. Волоконно-оптические распределённые системы измерения физических величин (FBGS) – УГТ8, **TRL-8**
3. Модульная система регистрации сейсмических данных для сухопутных и морских условий, включая предельное мелководье (MES+POF) – УГТ3, **TRL-4**
4. Гибридная система регистрации сейсмических данных (DAS+MES) – УГТ3, **TRL-4**

Аппаратно-программный комплекс для сейсмического 4D мониторинга и сейсморазведки в транзитной зоне



TRL-8: Опытный образец прошёл полевые испытания

«Половина добытой нефти с конца 1990-х годов стала результатом оптимизации, проведенной на основании полученных при помощи 4D сейсмического мониторинга данных»

Тор Вегар Мэрдален,
ведущий геофизик компании Statoil (ныне Equinor)

Высокоточный перманентный пассивный и периодический активный сейсмический мониторинг на весь период эксплуатации месторождения, с получением данных в режиме реального времени

▶ Перманентный сейсмический 4D мониторинг разрабатываемых месторождений позволяет отслеживать изменения пластовых параметров и обеспечивает принятие своевременных технологических решений для увеличения извлекаемости запасов

▶ Возможность проведения сейсморазведки в транзитных зонах и на предельном мелководье значительно расширяет возможности и границы нефтегазовой геологоразведки

▶ Заложенная в системе возможность гидроакустического мониторинга позволяет, в том числе, вести мониторинг работы и контроль безопасности состояния подводной добывающей инфраструктуры.



ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

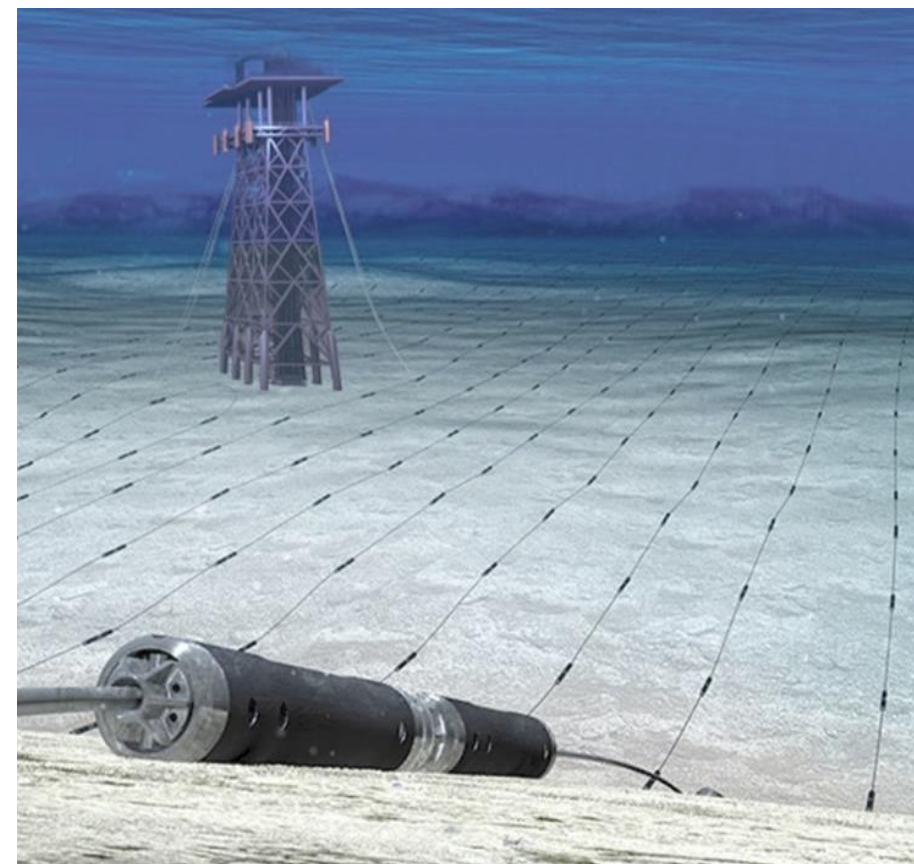
Система 4D мониторинга в полной конфигурации представляет собой расстановку из донных кос, обеспечивающую необходимое площадное покрытие

Использование **донных систем** для перманентного 4D мониторинга месторождений (в сравнении с буксируемыми сейсмическими косами или донными станциями), имеет ряд существенных преимущественных эффектов:

улучшение повторяемости геометрии приёмной системы за счет ее стационарной раскладки непосредственно на морском дне без необходимости подъёма для считывания данных

получение данных более высокого качества, что существенно влияет на достоверность создаваемых геологических моделей

получение данных в реальном времени с возможностью контроля качества, что недостижимо при использовании донных станций



В системе 4D мониторинга реализованы две передовые технологии:

- 1) молекулярно-электронная технология изготовления сенсоров;
- 2) технология передачи мощности по оптоволокну «Power-over-Fiber» (PoF)

Молекулярно-электронная технология

Измерение параметров волновых полей на физических принципах молекулярно-электронного переноса – интерпретация вариаций межэлектродного тока, вызванного перемещением электролита под действием сил инерции в электрохимической ячейке.

Технические характеристики регистрирующего модуля:

- число каналов: 4С (3 геофона + 1 гидрофон)
- рабочая полоса частот: 1-500 Гц;
- срок службы: не менее 15 лет;
- уход параметров: менее 1 % за год;
- разрядность АЦП: 24 бит;
- питание на модуль: 2 Вт (по оптоволокну);
- оптоволоконная сеть передачи данных, управления и энергоснабжения

Технология передачи мощности по оптоволокну «Power-over-Fiber» (PoF)

Лазерные диоды (источник оптической мощности) передают световой поток по оптоволокну для фотовольтаического преобразования на стороне потребителя. При этом обеспечиваются полная гальваническая развязка от источника питания, низкий уровень потерь мощности, отсутствие наводок, пожаро-, взрыво- и электробезопасность, экологичность.



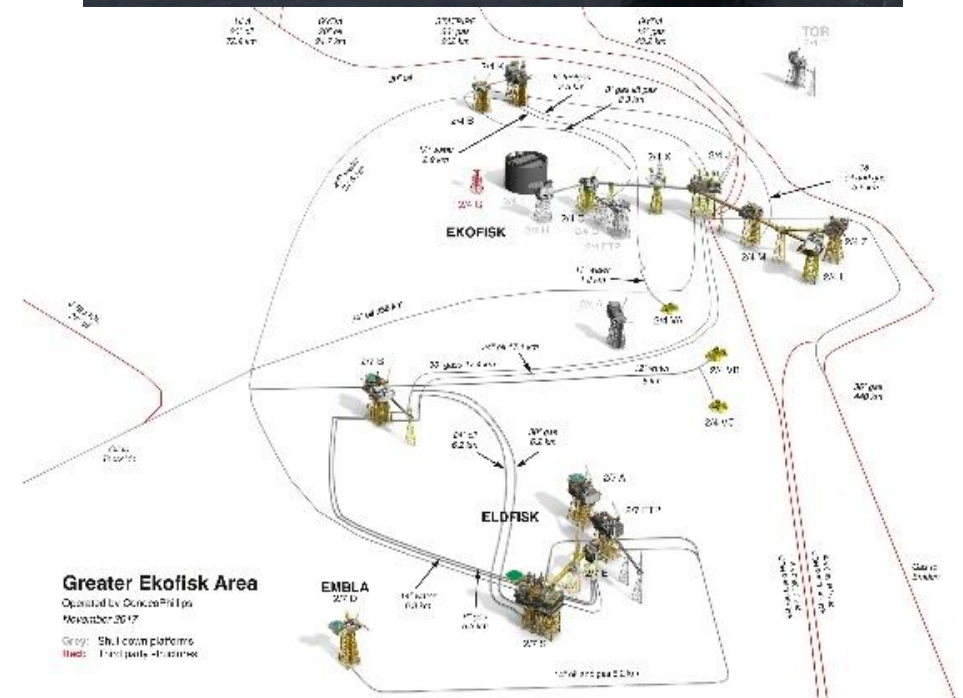
АНАЛОГИ И КОНКУРЕНТЫ

Отечественных аналогов системе не существует

4D сейсмический мониторинг в России был проведен только лишь на одном месторождении – Пильтун-Астохском (Сахалин), что не позволяет назвать основных конкурентов или альтернативные решения проблемы

Мировая практика

- Систем сейсмического 4D мониторинга в продаже нет, они разрабатываются под конкретное месторождение по заказу добывающих или сервисных компаний;
- Среди производителей можно выделить Sercel Optoplan и Alcatel Submarine Networks, создавших системы Ekofisk LoFS (м/р Ekofisk и Valhall), Optoplan (м/р Johan Sverdrup);
- Эффективность систем 4D мониторинга практически доказана более, чем 15-летним опытом успешной работы западных добывающих компаний на Северном море, увеличивших сроки службы своих месторождений на 10-15 лет с экономическим эффектом в сотни миллионов долларов;
- В перспективе, каждое месторождение должно быть оборудовано системой резервуарного мониторинга (как это решено в Норвегии на законодательном уровне)



СТАТУС ПРОЕКТА

создан и успешно выдержал натурные испытания прототип сейсмической системы 4D мониторинга с полным соответствием функциональных параметров и возможностью масштабирования до промышленного продукта при сохранении требуемого технологического уровня (TRL-8).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЗАДЕЛ для реализации проекта:

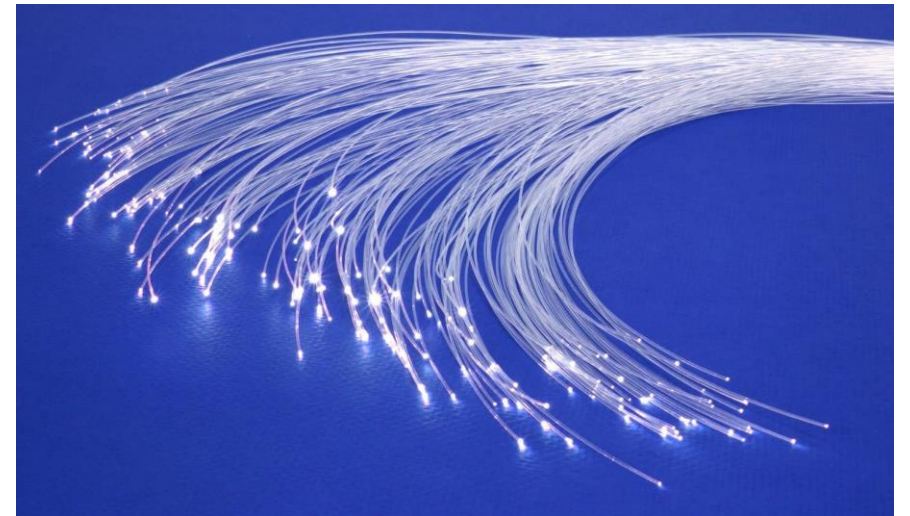
1. Разработан экспериментальный образец 4К сейсмической системы перманентного 4D мониторинга с комплектом конструкторской документации;
2. Разработано специализированное управляющее ПО с программной документацией;
3. В системе реализовано оригинальное техническое решение энергообеспечения регистрирующего оборудования по волоконно-оптическому кабелю с использованием технологии фотовольтаического преобразования, впервые применяемое в сейсмических системах;
4. Разработаны новые технические решения для обеспечения высокой стабильности параметров сенсоров, применяемых в качестве чувствительного элемента геофонов и гидрофонов сейсмической системы;
5. Успешно проведены натурные испытания экспериментального образца сейсмической системы перманентного 4D мониторинга.
6. Имеется полный комплект РКД на Комплекс.



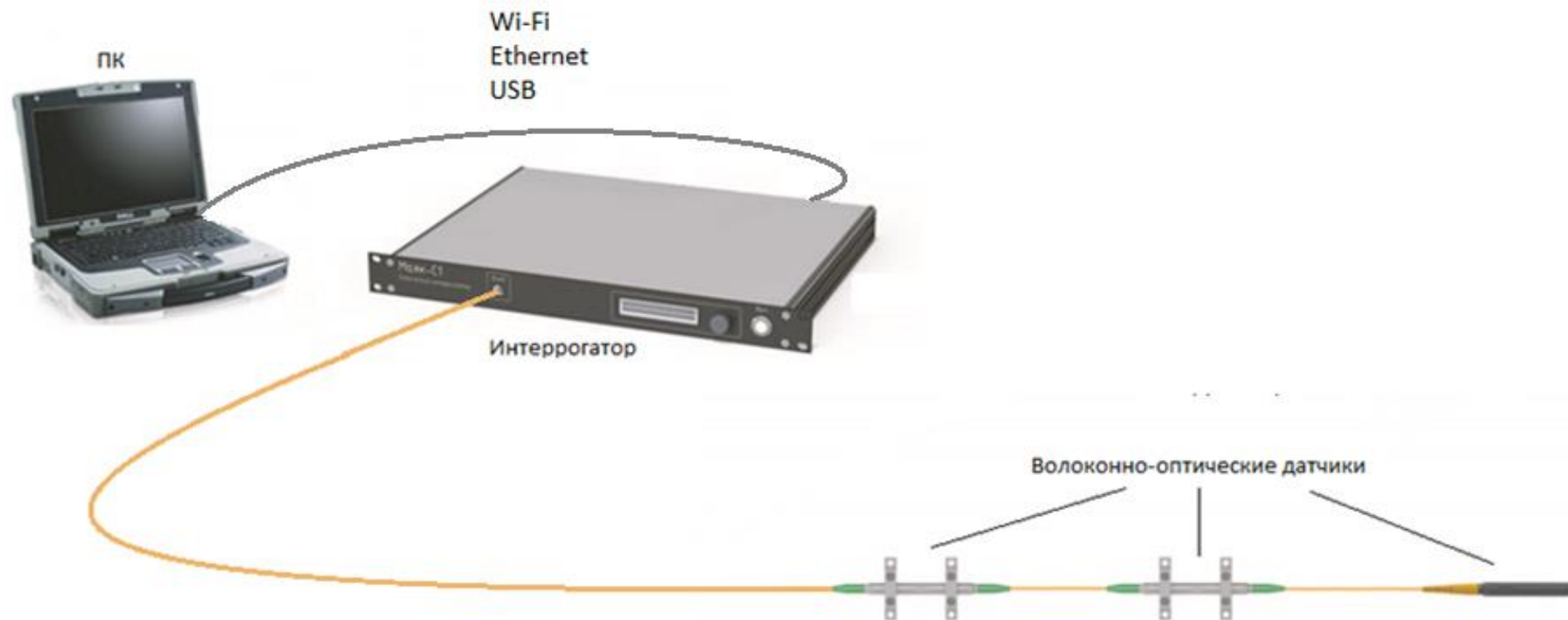
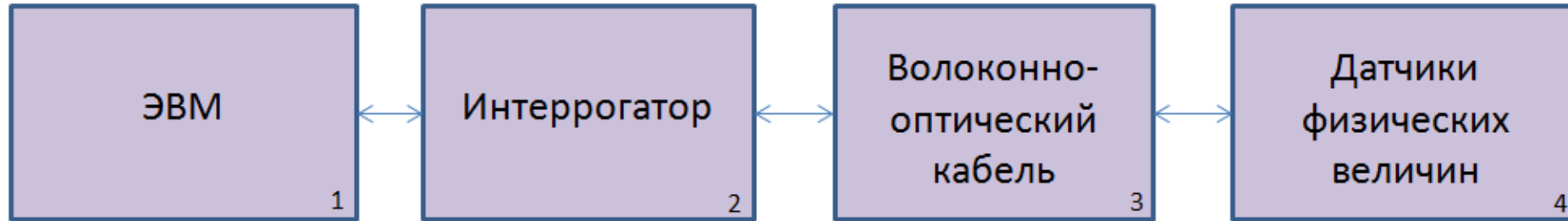
Волоконно-оптические распределённые системы измерения физических величин



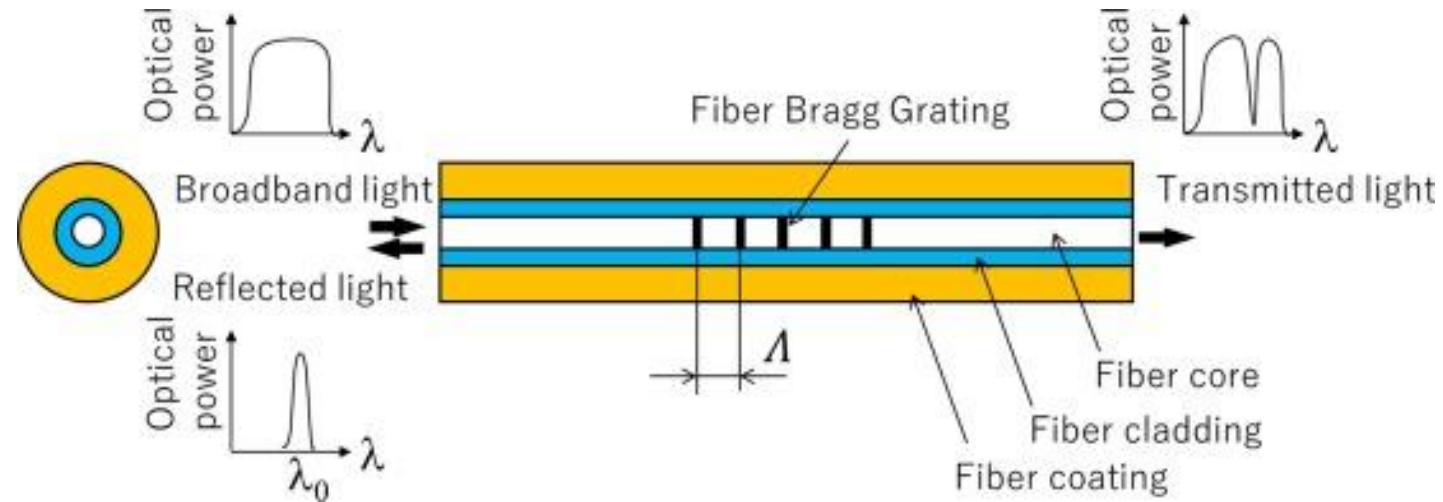
TRL-8: Выпущены установочные серии по заказам предприятий нефтегазовой отрасли



ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА



Физические основы измерений температуры и деформации на основе решёток Брэгга (FBG optical sensors)



$$\lambda_0 = 2n_{eff}\Delta$$

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = k\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T$$

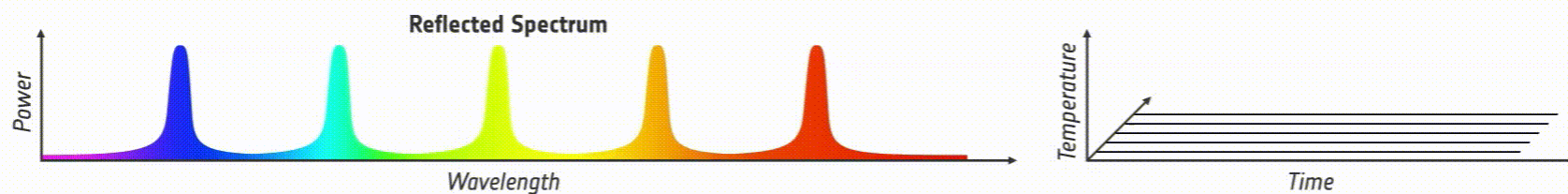
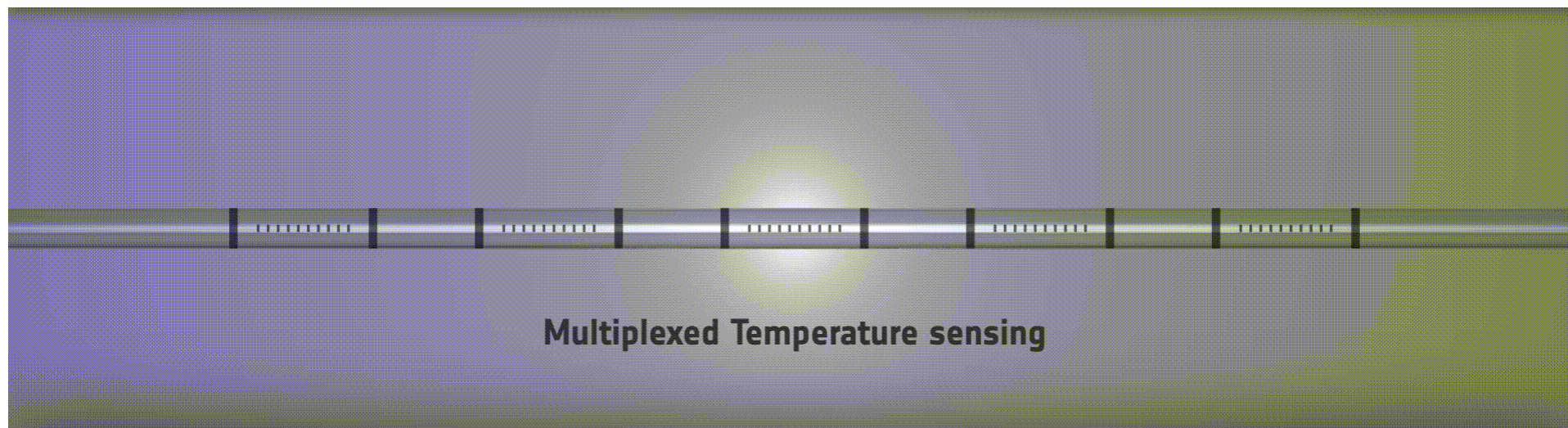
Для стандартного оптоволокна SMF-21:

$$\Delta\lambda_0/\lambda_0/\Delta T = 6,678 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

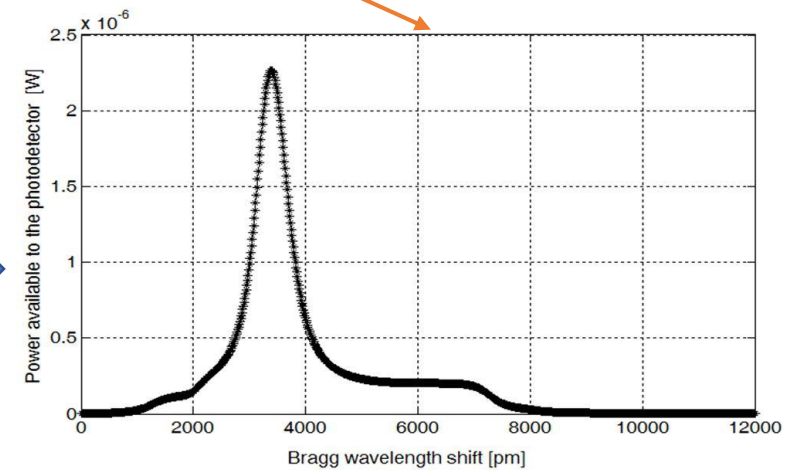
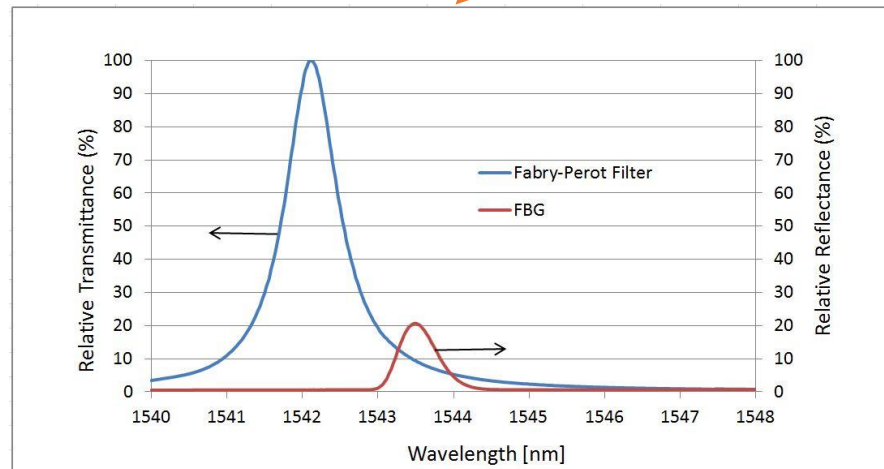
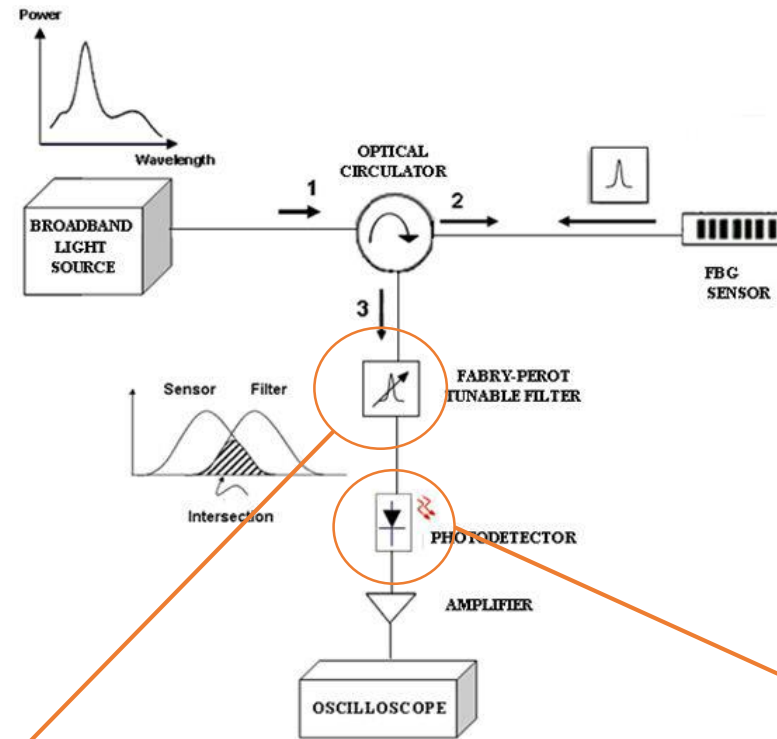
$$\Delta\lambda_0/\Delta T = 10,3 \cdot 10^{-12} \text{ м, при } \lambda_0 = 1550 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

Физические основы измерений температуры и деформации на основе решёток Брэгга (FBG optical sensors)

Система датчиков в пределах одного канала обеспечивается за счёт использования решёток Брэгга с различными постоянными



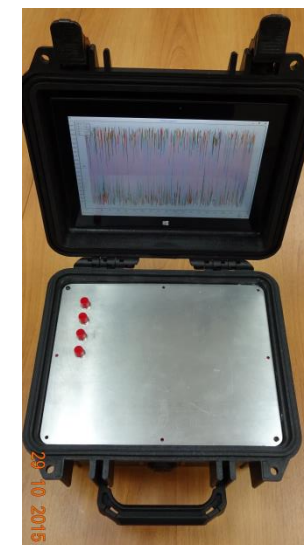
Принцип работы интеррогатора на основе эффекта Фабри-Перро



- измерение параметров объекта на расстоянии от 1 м до 50 км без потери точности;
- опрос от 1 до 1000 датчиков физических величин одним интеррогатором;
- одновременное измерение различных параметров объекта при последовательном подключении датчиков;
- возможность удаленного мониторинга и управления с 3 уровнями доступа (Ethernet);
- отсутствие токоведущих проводов в измерительной линии – высокая устойчивость к воздействию окружающей среды, отсутствие необходимости подвода питания к точкам измерения;
- низкое энергопотребление.

Для спецприменения возможно конструктивное исполнение, позволяющее выдерживать удары, вибрации, климатические факторы и иные воздействия.

ИНТЕРРОГАТОР (ЗАКАЗЧИК: ТРАНСНЕФТЬ)



Технические характеристики и функциональные параметры

Параметр	Значение	
	Маяк-С	Маяк-П
Исполнение	в стойку 19"	пыле- и влагозащищённое
Частота опроса, Гц	от 0,1 до 100	
Диапазон длин волн, нм	от 1525 до 1565	
Число оптических каналов, не более	128	8
Число датчиков на канал, не более	20	
Разрешение, пм	0,5	
Погрешность измерения длины волны, пм, не более	± 1,25	
Оптический разъем	FC/APC	
Интерфейсы	Ethernet, USB	Wi-Fi
Рабочий диапазон температур, °С	от плюс 5 до плюс 45	от минус 20 до плюс 45
Условия эксплуатации, влажность, %	от 0 до 85, без конденсата	от 0 до 100
Напряжение питания, В	115-230 (50/60 Гц)	
Номинальная потребляемая мощность, Вт, не более	60	
Габариты, ВхГхШ, мм	44x350x483	
Вес, кг, не более	5	

Датчики давления (заказчик Транснефть/Омега)

Технические характеристики и функциональные параметры

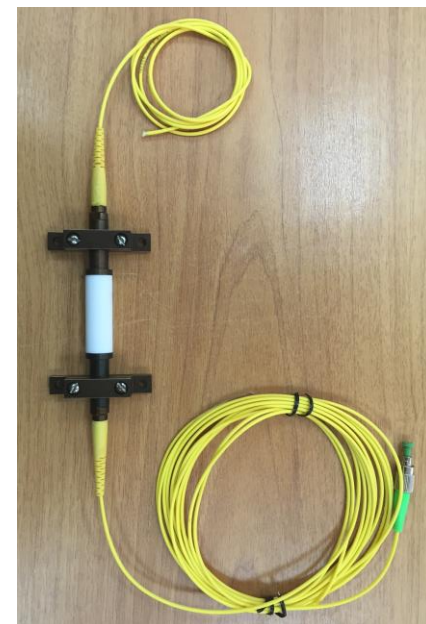
Параметр	Значение
Тип датчика	концевой
Центральная длина волны, нм	1525-1565
Диапазон измерения давления, Атм.	до 2000
Точность измерения давления, %FS	0,1
Термокомпенсация	есть
Диапазон рабочих температур, °С	от - 50 до + 350
Длина кабеля, м	1
Тип разъема	FC/APC
Материал корпуса	по согласованию с заказчиком
Размеры датчика, мм	по согласованию с заказчиком



Датчики растяжения и деформации (заказчик Транснефть/Омега)

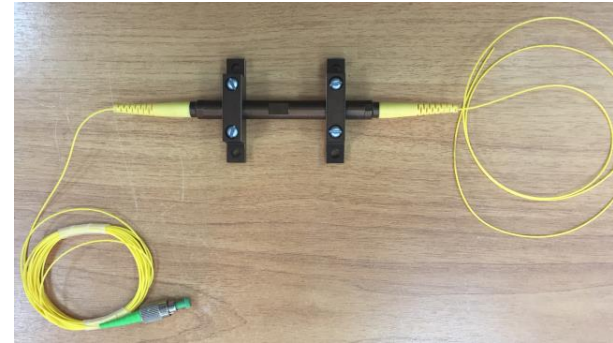
Технические характеристики и функциональные параметры

Параметр	Значение
Тип датчика	концевой/проходной
Центральная длина волны, нм	1525-1625
Диапазон измерения, мк	± 2500
Разрешение, нм	0,5
Точность измерения, пм	1
Температурная компенсация	есть
Разрешение по температуре, °С	0,01
Точность по температуре, °С	0,1
Рабочий диапазон температур, °С	от - 50 до + 150
Длина кабеля, м	1
Тип разъема	FC/APC
Габаритные размеры, мм	по согласования с заказчиком





Исполнение в виде
концевого датчика



Исполнение в виде
проходного датчика

Технические характеристики и функциональные параметры

Параметр	Значение	
	датчик температуры	высокотемпературный датчик
Диапазон измерения температуры, °C	от - 50 до +150	от - 50 до + 350
Разрешение, °C	0,01	0,1
Диапазон длин волн, нм	1525-1565	1525-1565
Материал корпуса	алюминий, медь, нержавеющая сталь, полимеры	по согласованию с заказчиком
Тип соединения	FC/APC, без коннекторов (по согласованию заказчиком)	
Габариты, мм	по согласованию с заказчиком	
Толщина кабеля, мм	по согласованию с заказчиком	
Вес, кг	по согласованию с заказчиком	

Датчики вибрации



Технические характеристики и функциональные параметры

Параметр	Значение
Тип датчика	концевой
Частотный диапазон вибрации, Гц	1-10000000
Точность измерения, пм	1
Температурная компенсация	есть
Разрешение по температуре, °С	0,1
Точность по температуре, °С	0,1
Рабочий диапазон температур, °С	от - 50 до + 150
Длина кабеля, м	1
Тип разъема	FC/ARC или OEM
Габаритные размеры, мм	по согласованию с заказчиком

Модульная система регистрации сейсмических данных для сухопутных и морских условий, включая предельное мелководье

TRL-4: Разработана базовая технология и прототипы отдельных составных частей



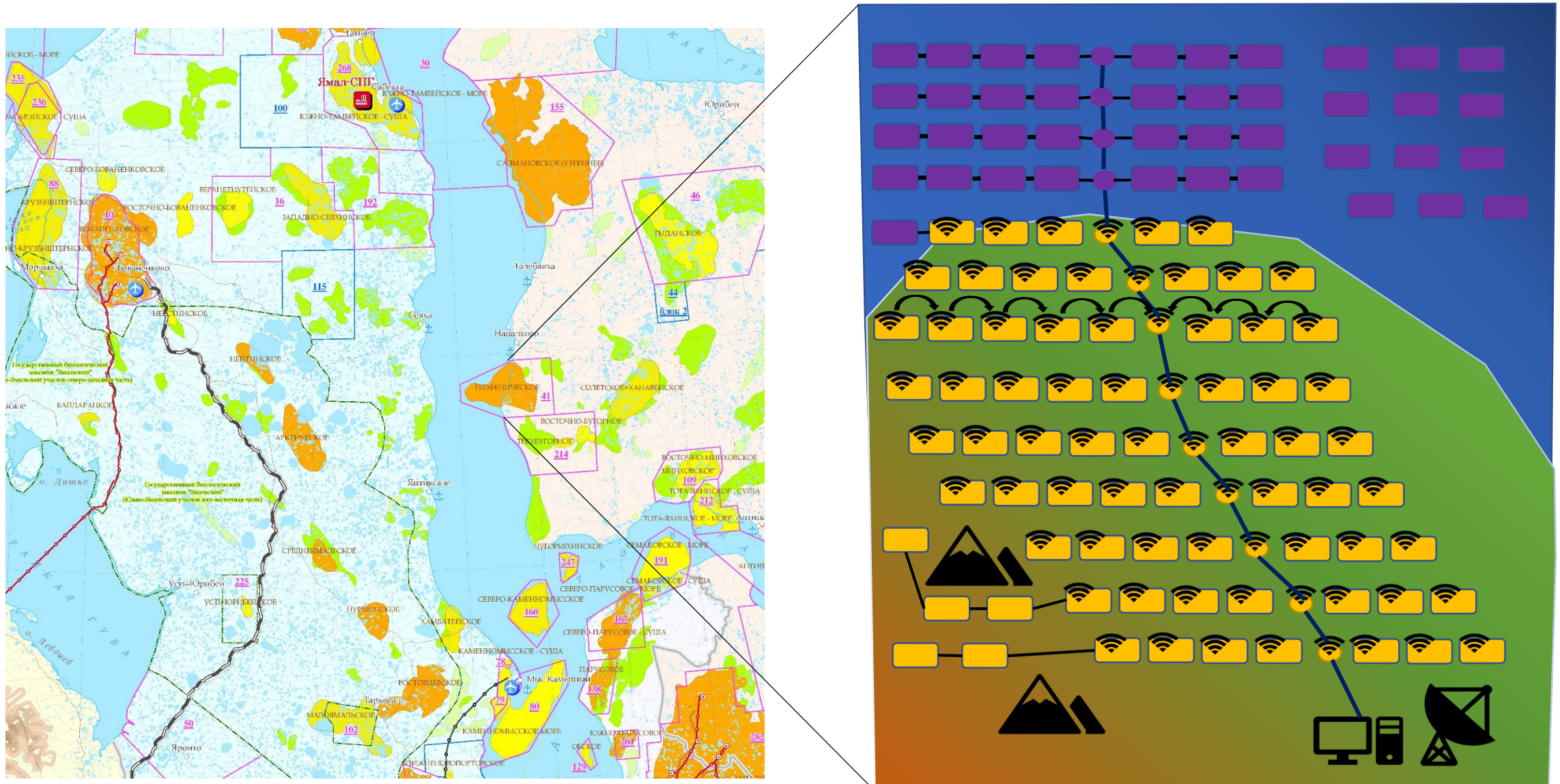
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



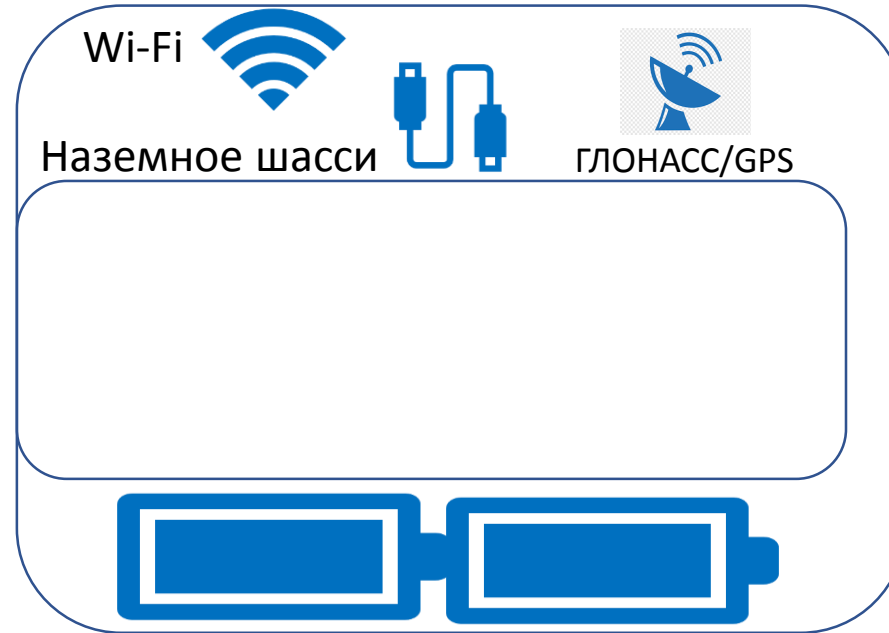
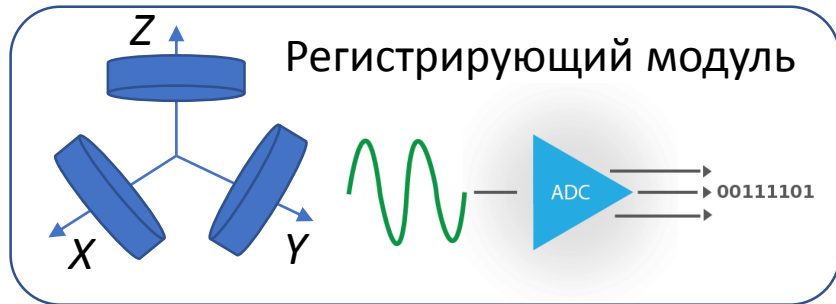
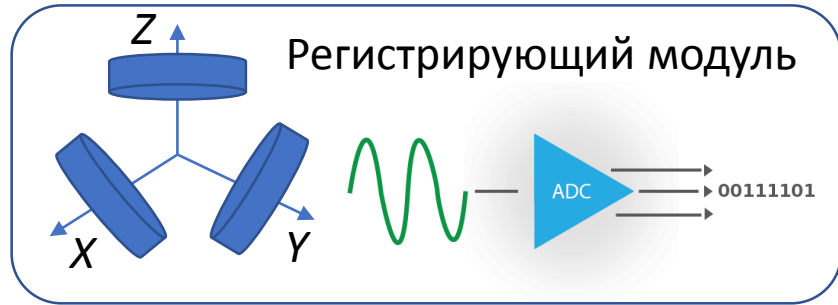
Разработка ведётся в рамках проекта, поддержанного Минобрнауки РФ по итогам конкурса на определение получателей субсидий из федерального бюджета на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств (14 очередь).



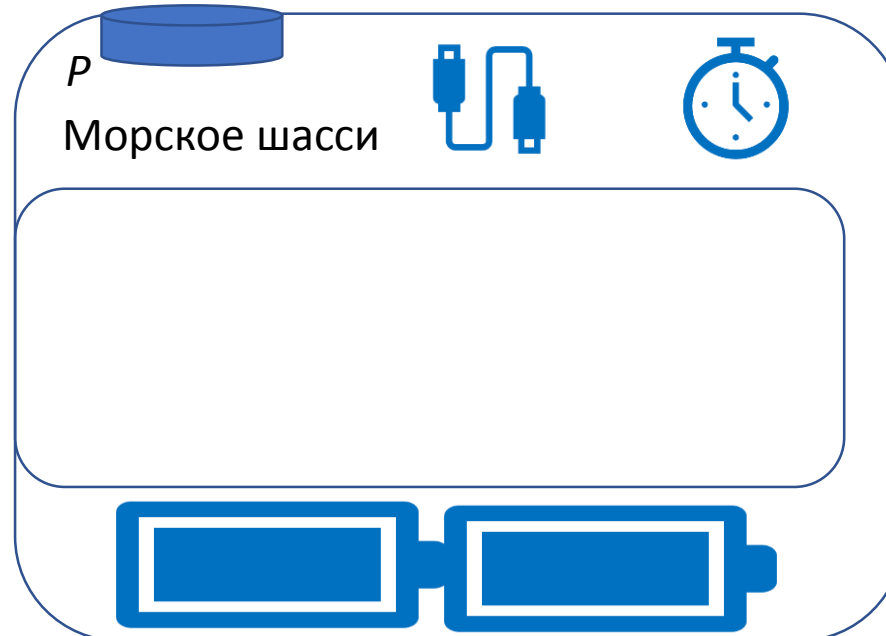
РАЗВЕРТЫВАНИЕ СИСТЕМЫ НА УЧАСТКЕ СУША-МОРЕ



МОДУЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ



= CPM-H



= CPM-M

Гибридная система сейсмического мониторинга с использованием малоапертурных групп и распределённого оптоволоконного сенсора

TRL-4: Разработана базовая технология и прототипы отдельных составных частей

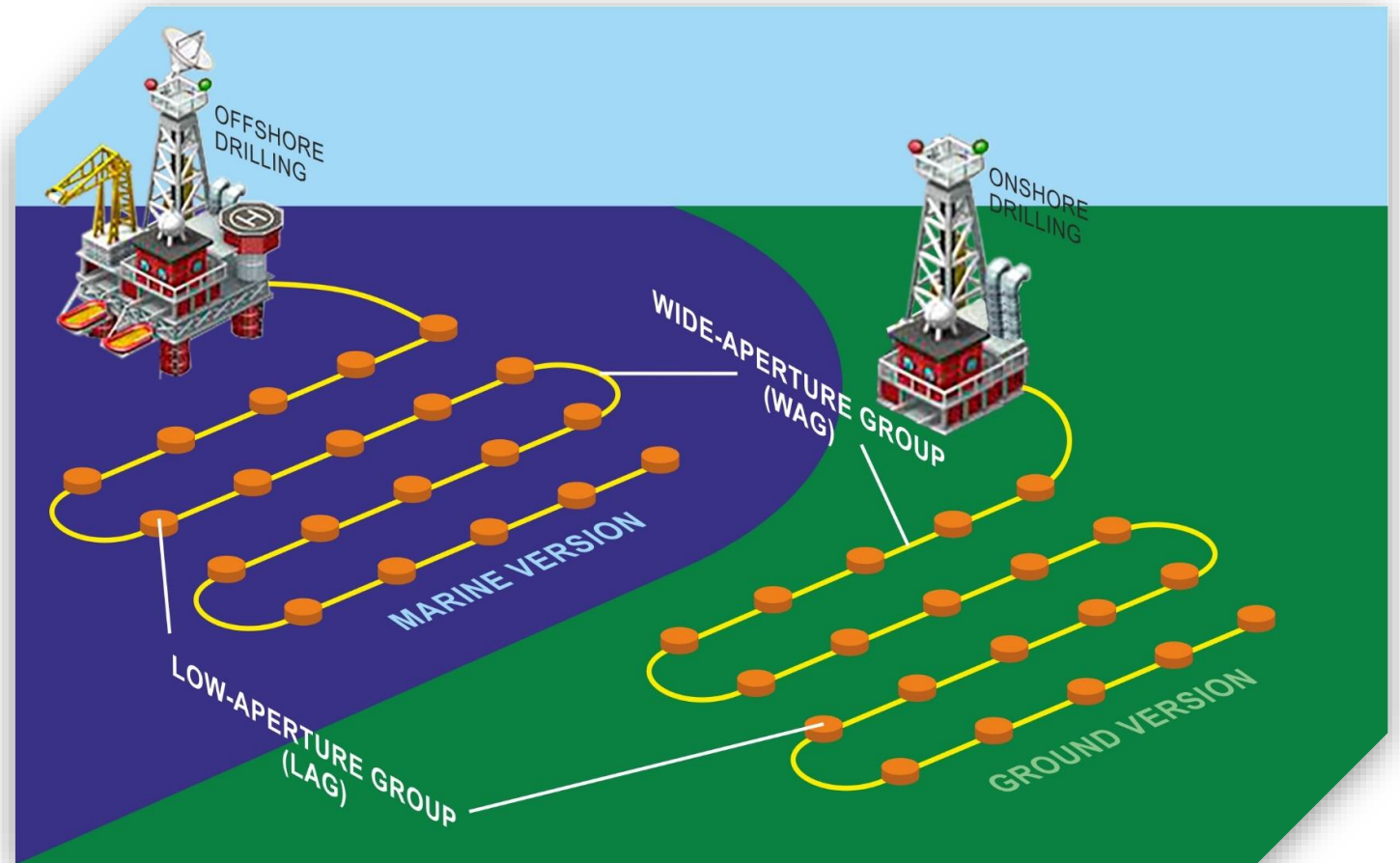


КОМПОНОВКА СИСТЕМЫ

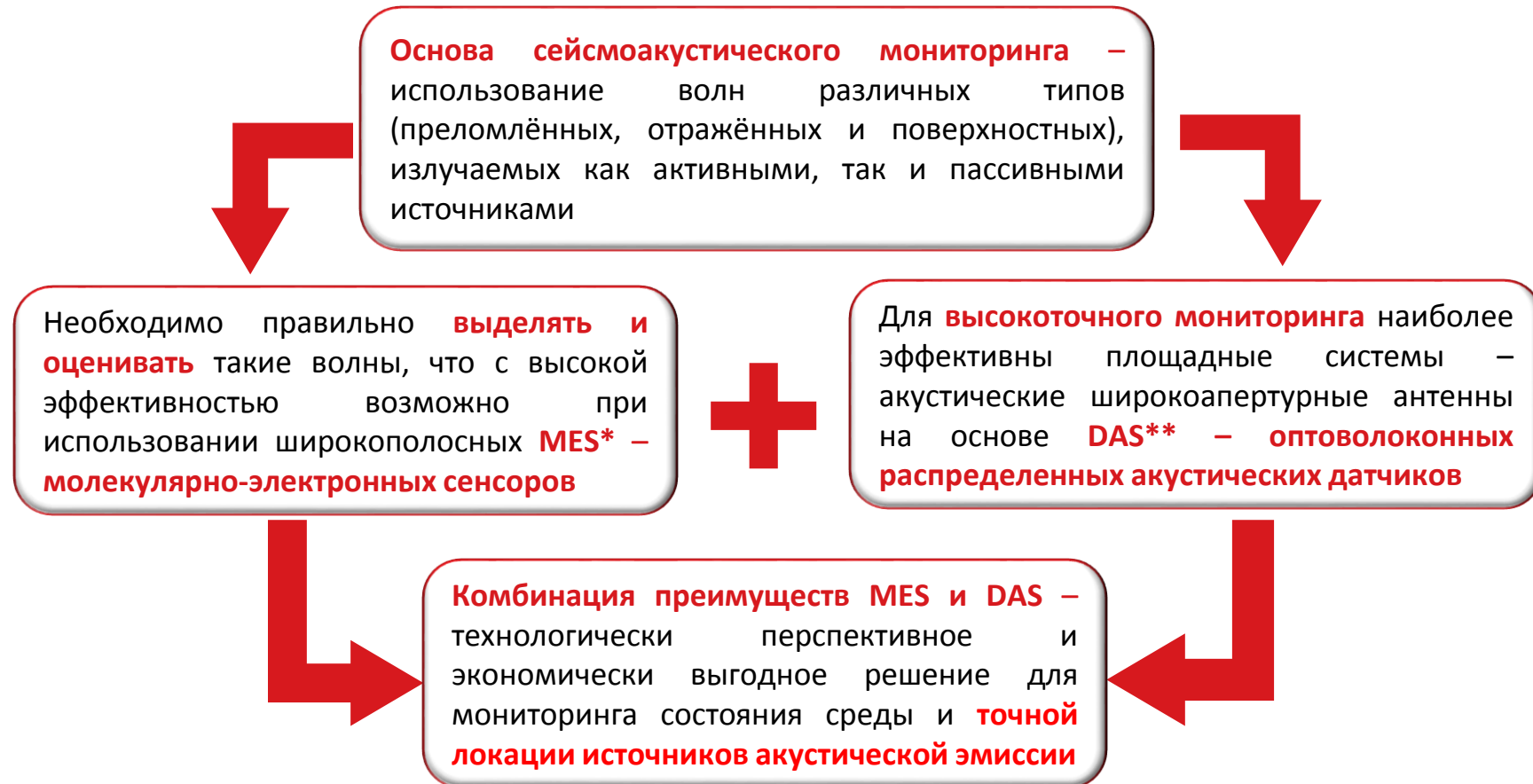
МАЛОАПЕРТУРНЫЕ ГРУППЫ (LAG) - трёхкомпонентные (ЗС, X-Y-Z) сейсмические станции расположенные на расстоянии порядка длины волны полезного сигнала.

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЕ ГРУППЫ (WAG) - однокомпонентные измерения при помощи распределённого оптоволоконного датчика.

Система может быть развёрнута как в условиях суши, так и в условиях континентального шельфа и транзитной зоны



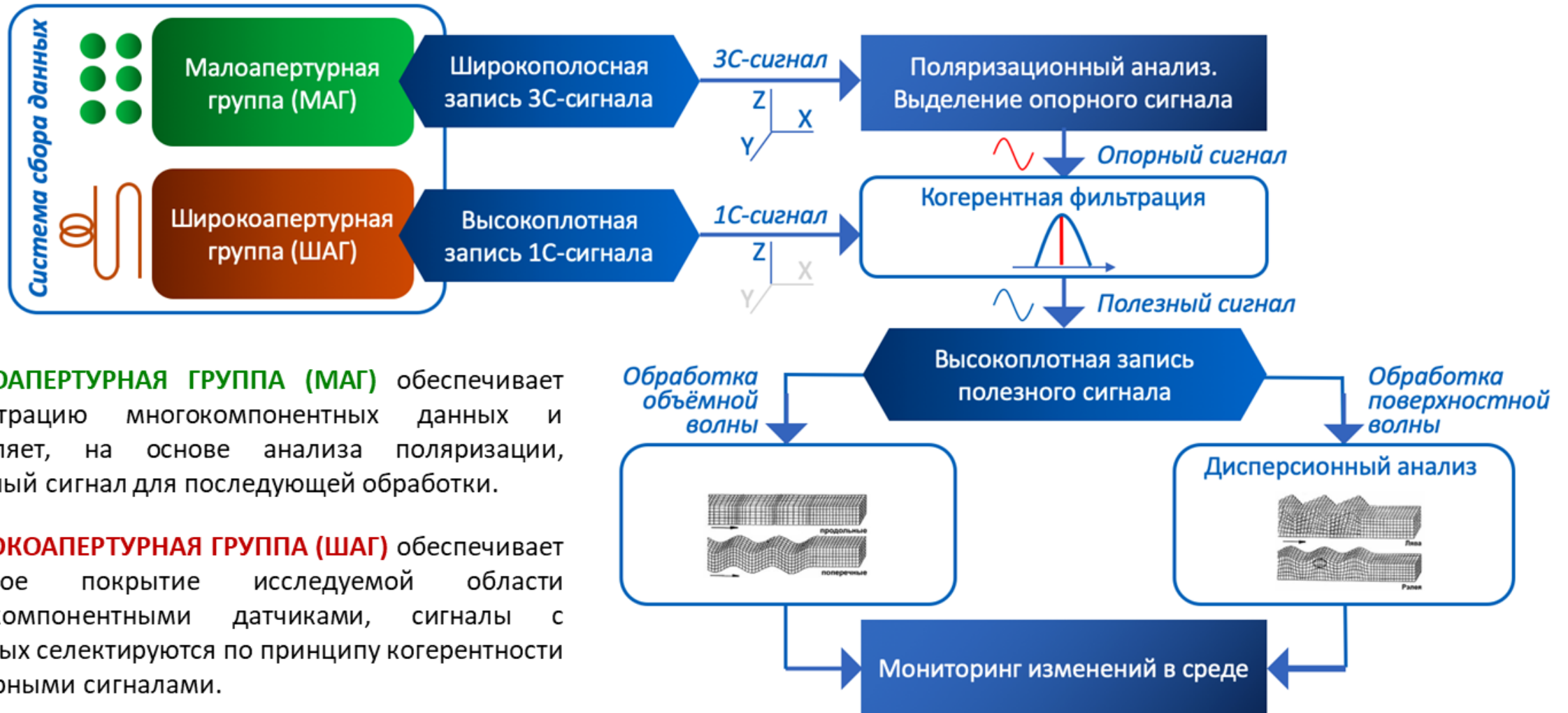
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА



*MES – Molecular Electronic Sensor;

**DAS – Distributed Acoustic Sensor.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ



МАЛОАПЕРТУРНАЯ ГРУППА (МАГ) обеспечивает регистрацию многокомпонентных данных и выделяет, на основе анализа поляризации, опорный сигнал для последующей обработки.

ШИРОКОАПЕРТУРНАЯ ГРУППА (ШАГ) обеспечивает плотное покрытие исследуемой области однокомпонентными датчиками, сигналы с которых селектируются по принципу когерентности с опорными сигналами.

A large, decorative graphic composed of many thin, overlapping blue lines that form a complex, wavy, circular shape, resembling a stylized wave or a molecular structure. It is centered on the slide.

Спасибо за внимание!

tikhotskii.sa@mipt.ru



Тихоцкий Сергей Андреевич

Член-корреспондент РАН, профессор РАН, доктор физико-математических наук
Директор Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Профессор Высшей школы инновационного бизнеса МГУ им. М.В. Ломоносова

tikhotskii.sa@mipt.ru