



РНФ

Российский
научный фонд



КРИОСЕЙСМОЛОГИЯ — НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В СЕЙСМОЛОГИИ

Виноградов Ю.А.
ФИЦ ЕГС РАН, г.Обнинск

г. Видное
5-8 июня, 2023 г.



КРИОСЕЙСМОЛОГИЯ – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ



Криосейсмология – междисциплинарная наука. Она объединяет 2 направления наук о земле – сейсмология и гляциология.

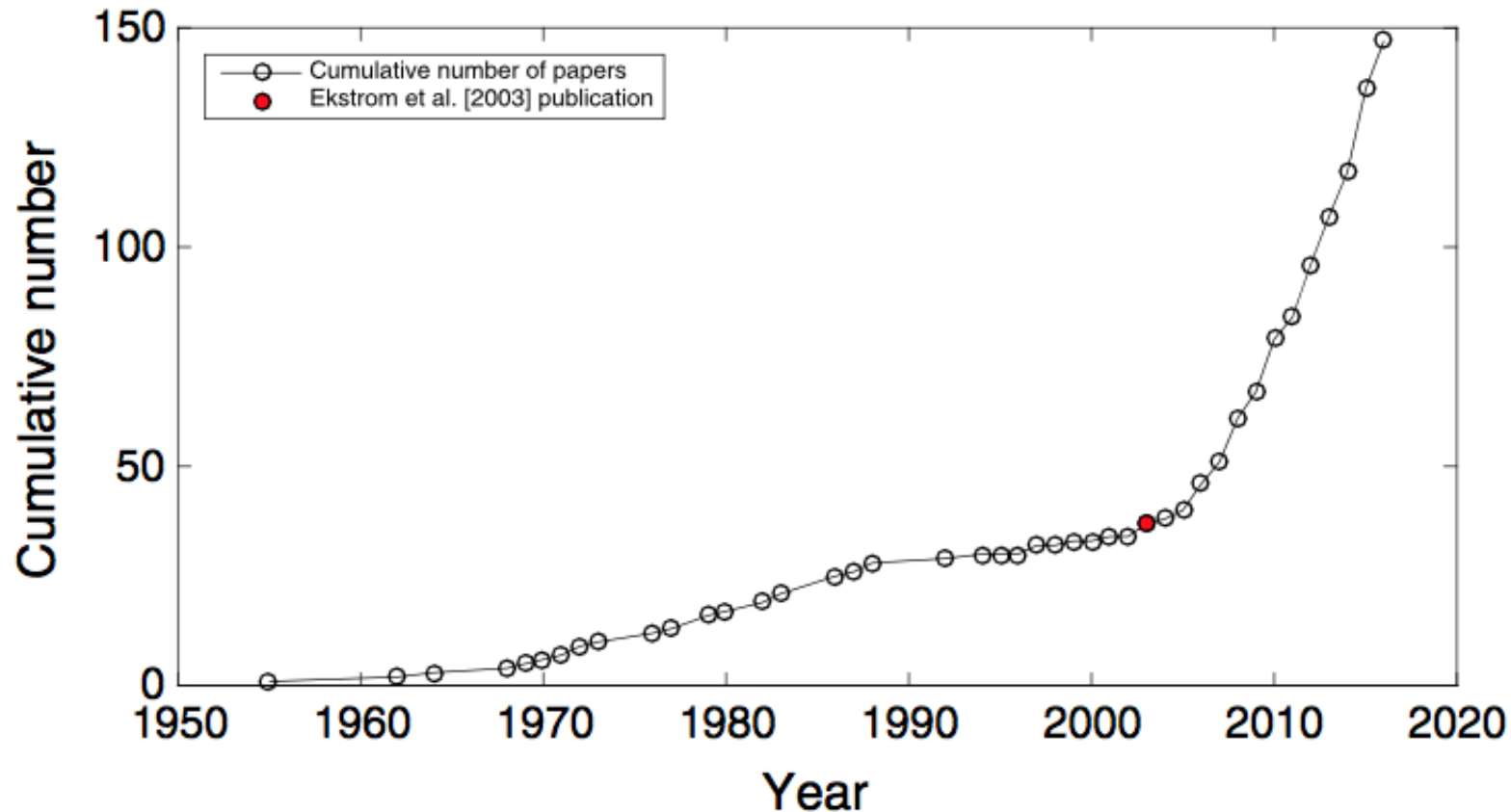
Криосейсмология исследует:

- сейсмические волны, генерируемые на границах лед-океан, лед-земная поверхность, связанные с движением, разрушением или ростом ледниковых покровов;
- сейсмические волны, генерируемые при различных деструктивных процессах в криолитосфере в зоне вечной мерзлоты.

Динамика публикаций по сейсмичности ледников (криосейсмология)



Larose et al., J. Appl. Geophys., 116, 2015, p. 708-758

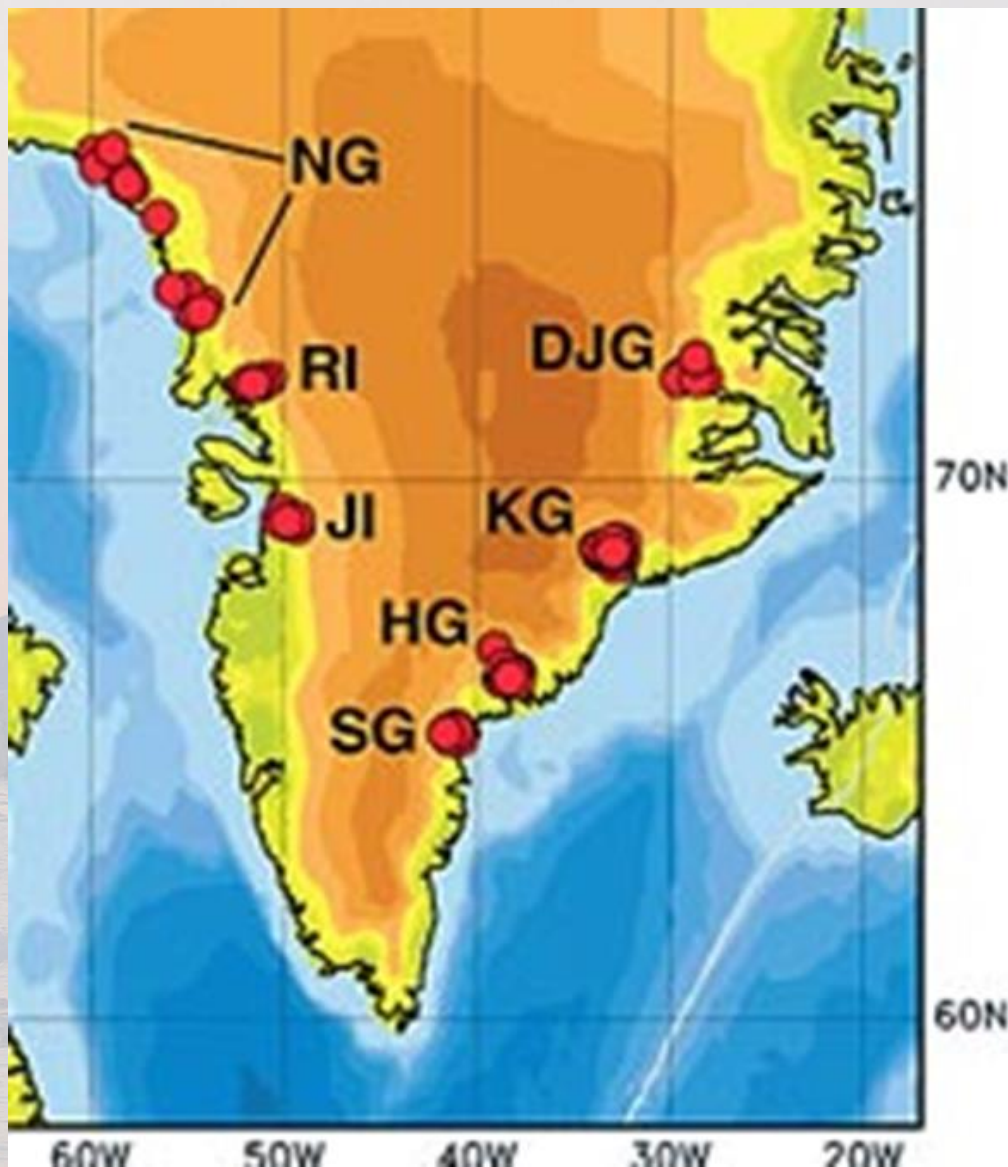


•Ekström, G., M. Nettles, and G. A. Abers (2003), Glacial earthquakes, *Science*, 302(5645), 622–624, doi:10.1126/science.1088057.

•Ekström, G., M. Nettles, and V. C. Tsai (2006), Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes, *Science*, 311(5768), 1756–1758, doi:10.1126/science.1122112.

•Tsai, V. C., and G. Ekstrom (2007), Analysis of glacial earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 112, F03S22, doi:10.1029/2006JF000596.

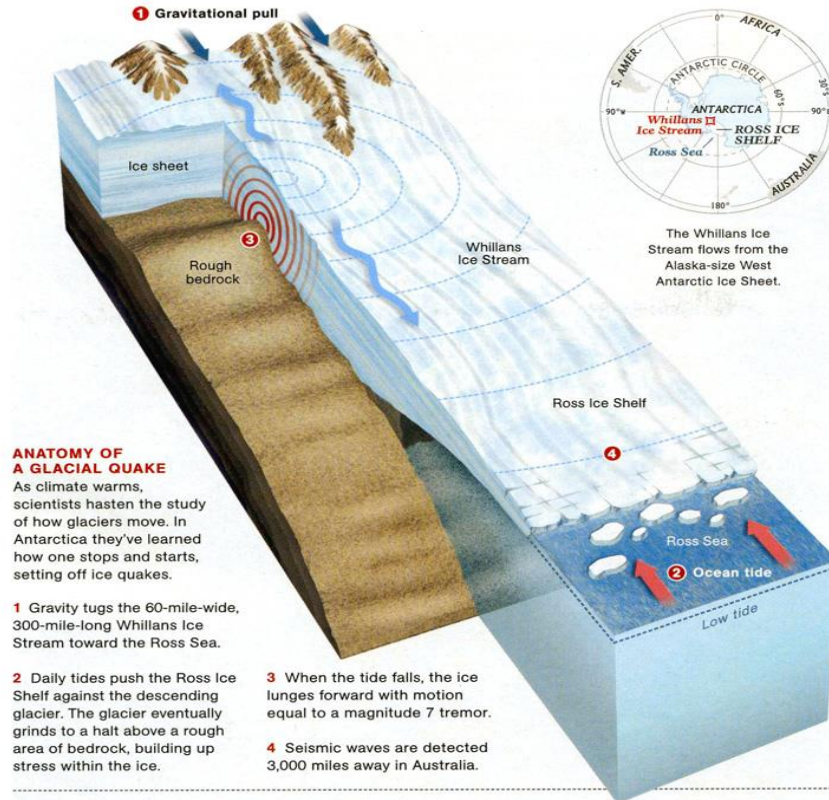
Льдотрясения в Гренландии



Goran Ekström

Ekström, G., M. Nettles, and G. A. Abers (2003), Glacial earthquakes, *Science*, 302(5645), 622–624, doi:10.1126/science.1088057.

Механизм образования льдотрясений



Douglas Wiens

Wiens, D., Anandakrishnan, S., Winberry, J. et al.

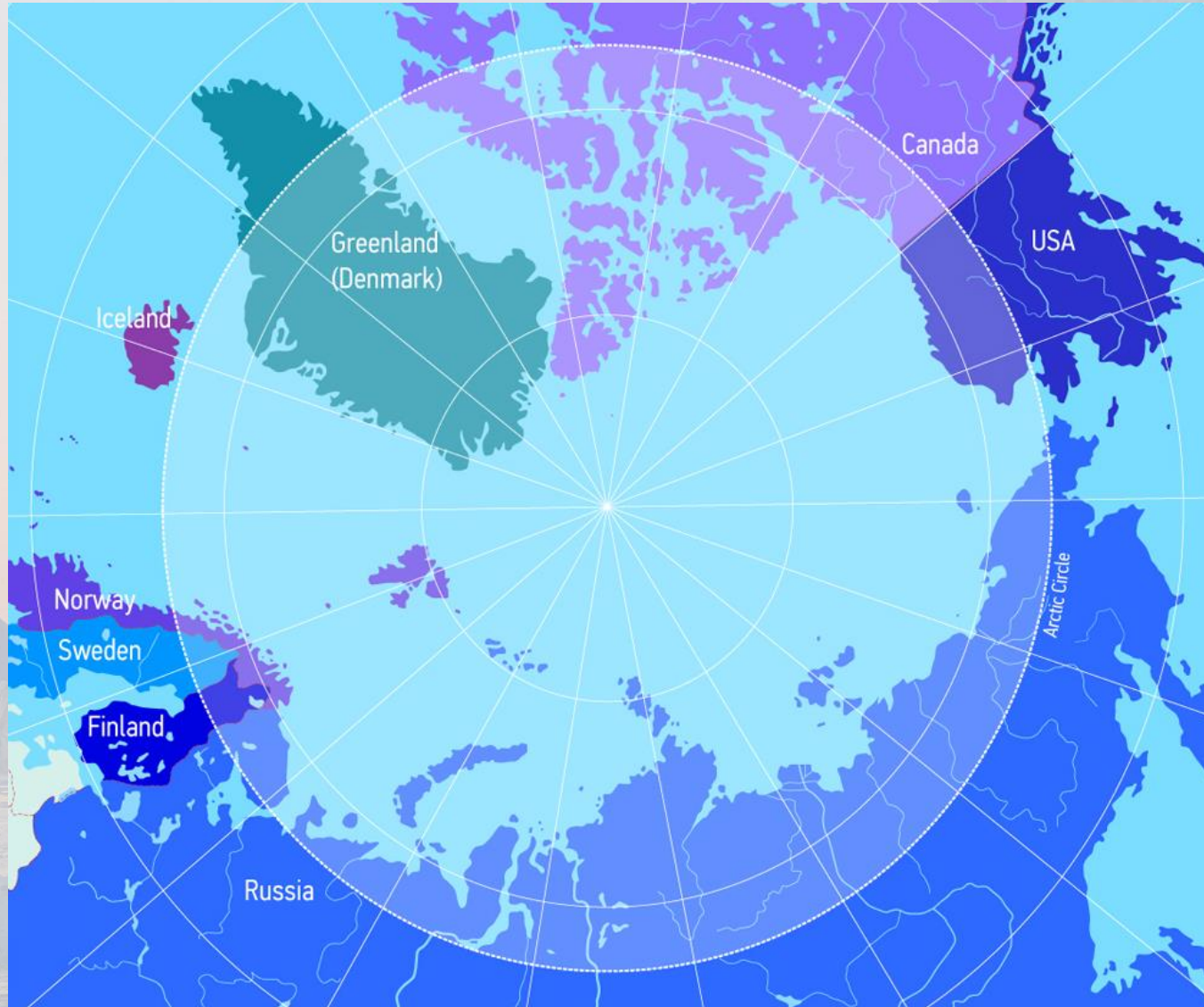
Simultaneous teleseismic and geodetic observations of the stick-slip motion of an Antarctic ice stream.

Nature 453, 770–774 (2008).

<https://doi.org/10.1038/nature06990>

Ice-Shaking News Most folks think that all glaciers move alike, creeping steadily toward sea or valley. News from Antarctica tells a joltingly different tale. Usually twice a day the massive Whillans Ice Stream, after sticking for hours on a plain of bedrock, slips forward up to two feet, triggering seismic waves equal to a magnitude 7 earthquake. Locating the source of the powerful quakes, researchers led by Douglas Wiens of Washington University in St. Louis suggest the unusual behavior occurs because the half-mile-thick glacier gets caught on the bedrock until tides from the Ross Sea free it. Someone standing on the ice wouldn't feel or see a thing. The slip plays out slowly, taking 20 to 30 minutes. Says Wiens, "It's an earthquake at glacial speed." —Tom O'Neill

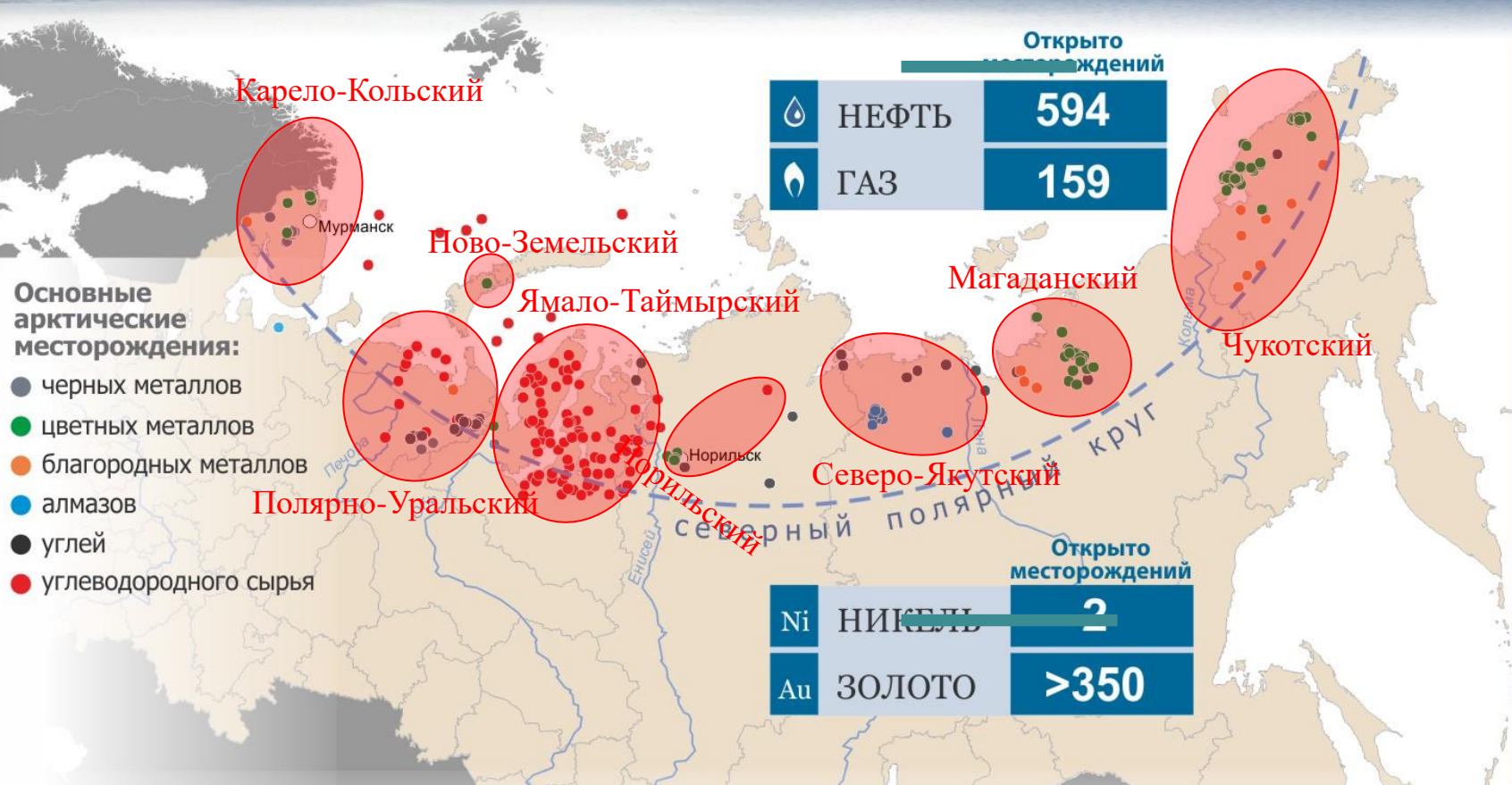
Арктика



30 млн. кв.км.

Основные проблемы: огромная и малонаселенная территория, отсутствие инфраструктуры, низкая транспортная доступность, плохая связь, сложные климатические условия, дикие животные, строгие экологические правила.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

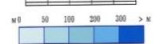


Арктическая зона является чрезвычайно богатым минерально – сырьевыми ресурсами регионом. В регионе сконцентрировано большинство уникальных и крупных месторождений углеводородов



АМНГП
ОБЗОРНАЯ КАРТА
БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

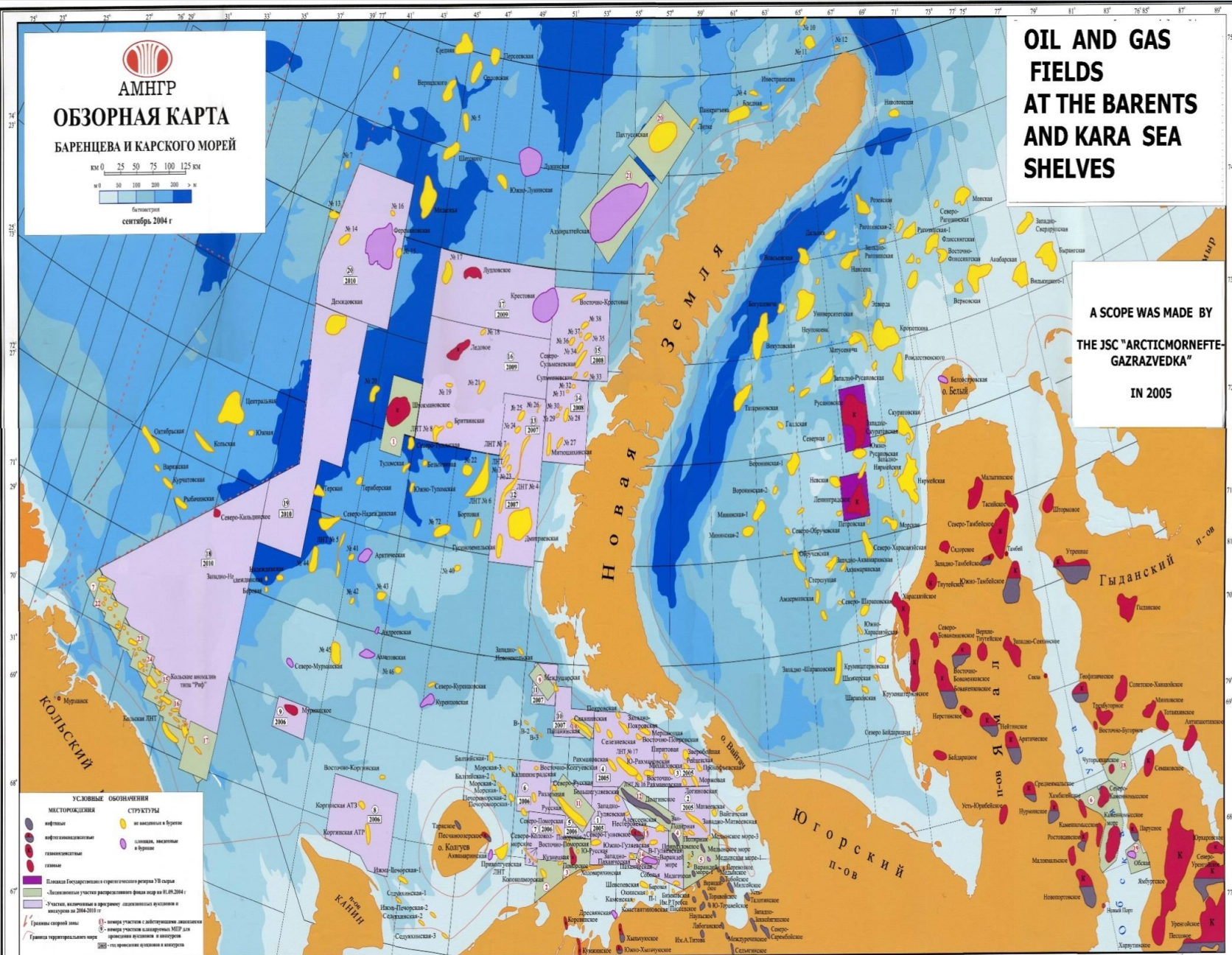
км 0 25 50 75 100 125 км



сентябрь 2004 г

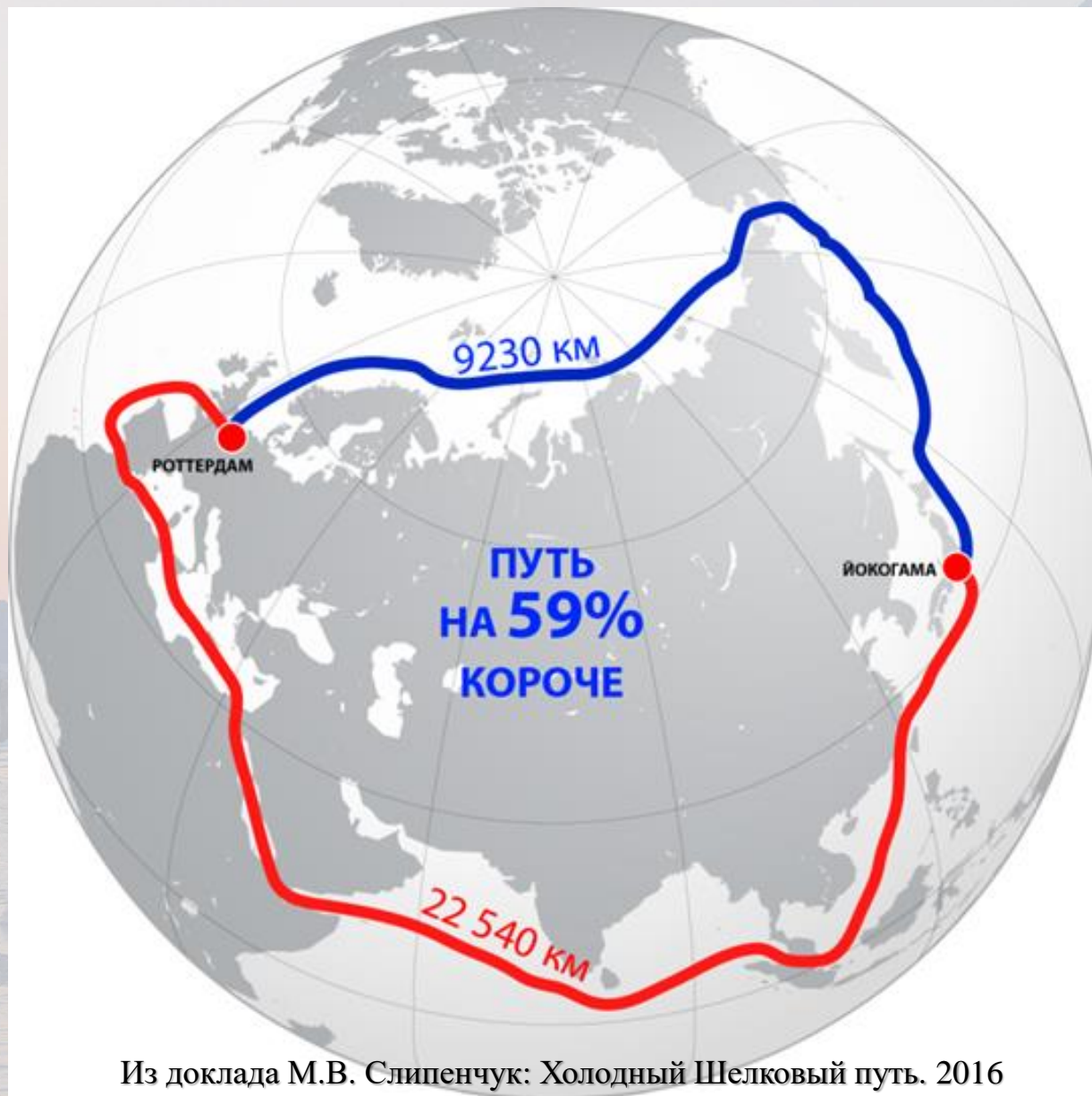
OIL AND GAS FIELDS AT THE BARENTS AND KARA SEA SHELVES

A SCOPE WAS MADE BY
THE JSC "ARCTICMORNEFTGАЗРАЗВЕДКА"
IN 2005



- УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ**
- МЕСТОРОЖДЕНИЯ: нефтяные, нефтенасыщенные, газовые
 - СТРУКТУРЫ: на шельфе и в бурье, шельфовые, в бурье
 - Площадь Государственного стратегического резерва УВ сырья
 - Лицензионные участки разработки флора моря на 01.01.2004 г
 - Участки, включенные в программу лицензирования участков и лицензирования на 2004-2010 гг
 - Границы морской зоны
 - Границы территориального моря
 - Участки с историческими лицензиями
 - Участки в лицензионном МОР для проведения лицензирования и лицензирования
 - Участки прироста флоры и лицензирования

Северный морской путь – национальный транспортный проект РФ



Из доклада М.В. Слипенчук: Холодный Шелковый путь. 2016

Сейсмическая сеть ФИЦ ЕГС РАН

**336 сейсмических станций, 56 – GSSN станций,
3 инфразвуковые группы**

Телесеismicкая сеть ФИЦ ЕГС РАН

- центральный ИОЦ
- цифровые станции

Региональные сети ФИЦ ЕГС РАН

- региональные ИОЦ
- локальные ИОЦ
- цифровые станции
- локальные сети

Центральное отделение ИОЦ и ССД

OBN, MOS, VRSR, ANN, SOC, ZEI, DRS, NORS

Кольский филиал
ИОЦ расположен в г. Апатиты,
сеть включает 7 станций.

Якутский филиал
ИОЦ расположен в г. Якутске,
сеть включает 23 станции.

Магаданский филиал
ИОЦ расположен в г. Магадане,
сеть включает 14 станций.

Камчатский филиал
ИОЦ расположен в г. Петропавловске-Камчатском,
сеть включает 77 станций.

Сейсмологический филиал
расположен в г. Новосибирск

Сибирский филиал
расположен в г. Новосибирск

Северо-Осетинский филиал
ИОЦ расположен в г. Владикавказе,
сеть включает 11 станций.

Дагестанский филиал ИОЦ
расположен в г. Махачкале, сеть
включает 16 станций.

Алтае-Саянский филиал
ИОЦ расположен в г. Новосибирске,
сеть включает 52 станции.

Байкальский филиал
ИОЦ расположен в г. Иркутске,
сеть включает 24 станции.

Бурятский филиал
ИОЦ расположен в г. Улан-Уде,
сеть включает 10 станций.

Сахалинский филиал
ИОЦ расположен в г. Южно-Сахалинске,
сеть включает 45 станций.

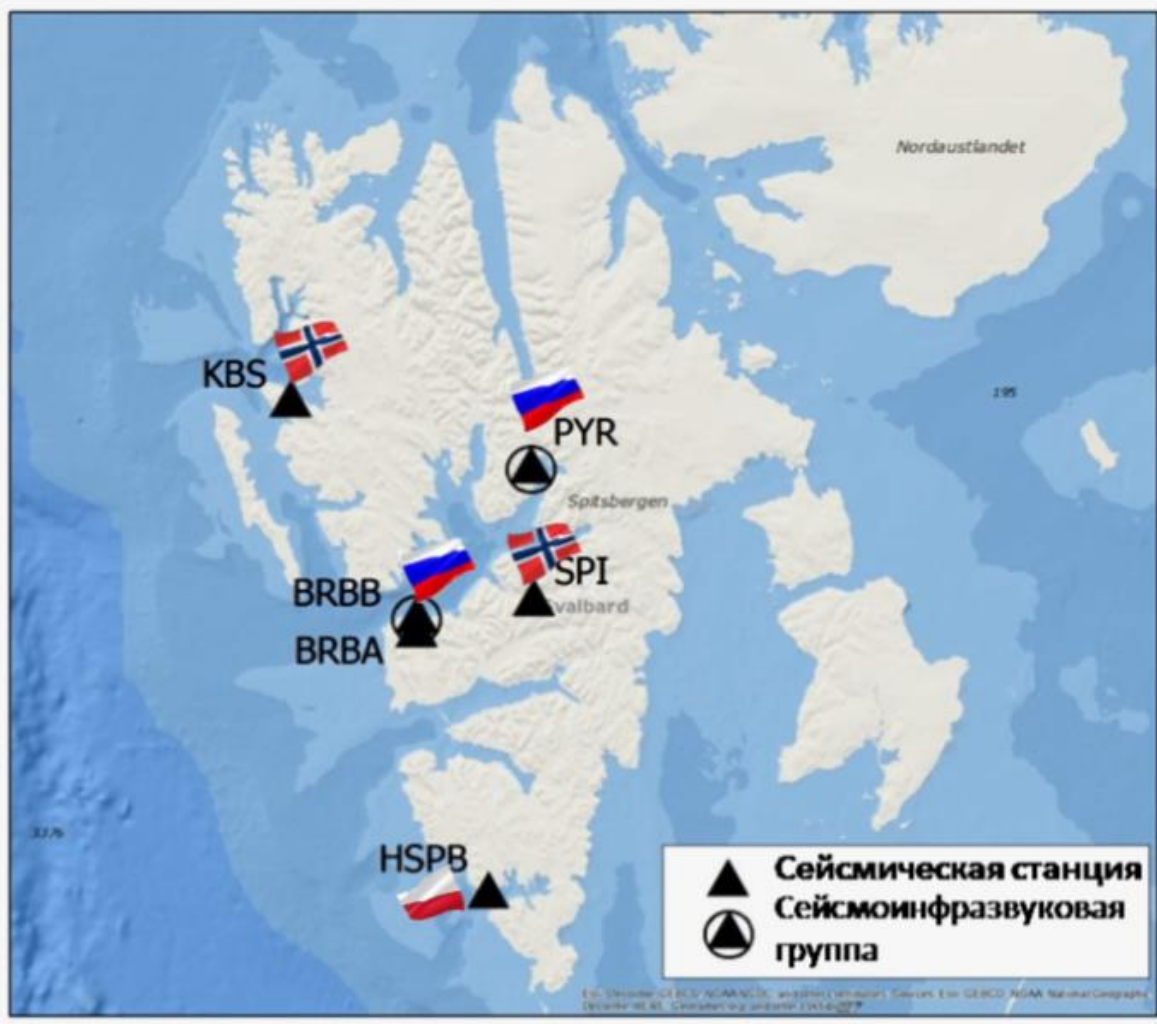


Архипелаг Шпицберген



Близко расположен к северному полюсу.
Доступен в любое время года
Безвизовый въезд, научные исследователи
из 20 стран мира
Прекрасная инфраструктура для научных
исследований, свободный обмен данными.
Наличие научной базы РАН на архипелаге.
Правительственная программа
обеспечения присутствия на архипелаге
Шпицберген. Более 100 пульсирующих ледников

Сеть используемых станций

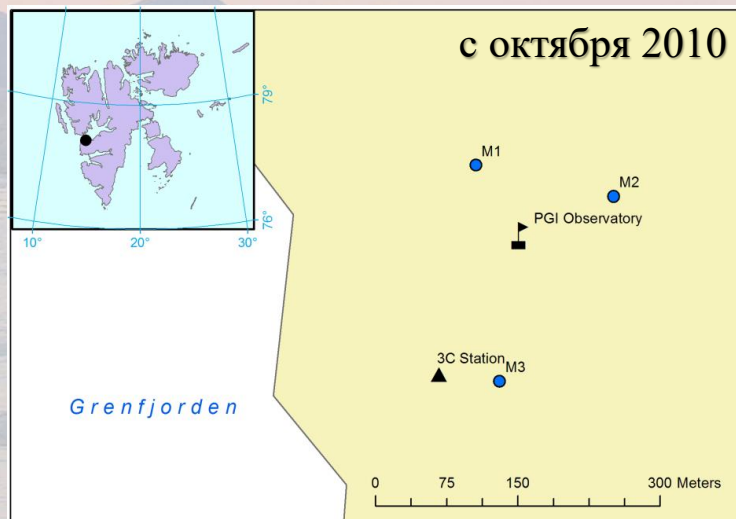
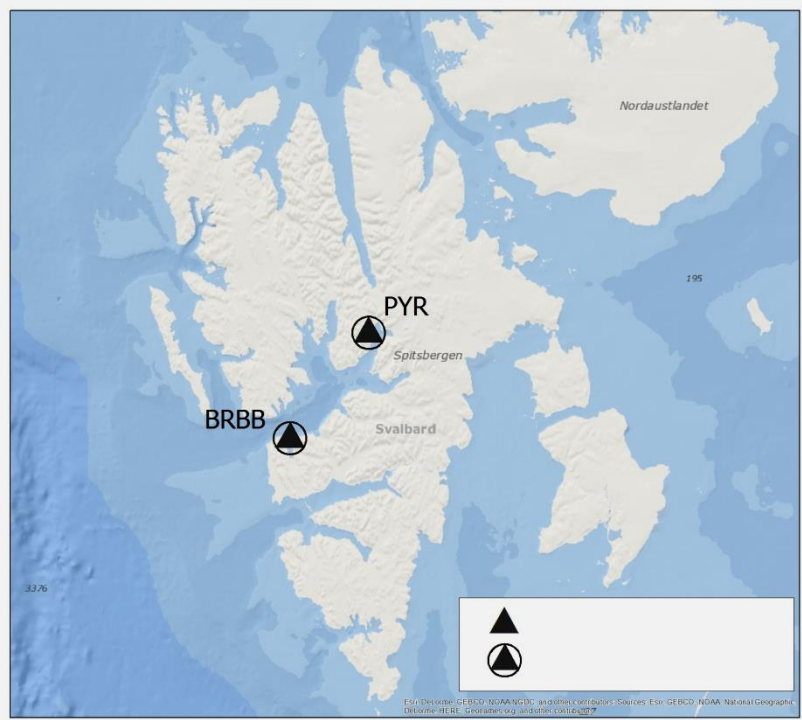


Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН проводит непрерывный мониторинг сейсмической обстановки района арх. Шпицберген в кооперации с зарубежными партнерами при помощи сети местных станций:

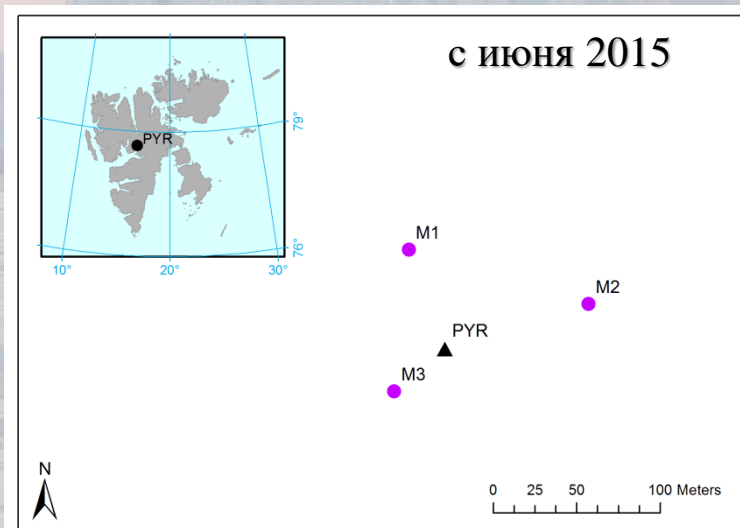
- BRBA, BRBB, PYR – КоФ ФИЦ ЕГС РАН
- KBS – Университет Бергена (IRIS)
- SPI – NORSAR
- HSPB – Институт Геофизики РАН

Сейсмические станции BRBB и PYR интегрированы в сейсмоинфразвуковые группы – дополнены инфразвуковыми датчиками, разнесенными в пространстве.

Сейсмоинфразвуковые группы ФИЦ ЕГС РАН на архипелаге Шпицберген

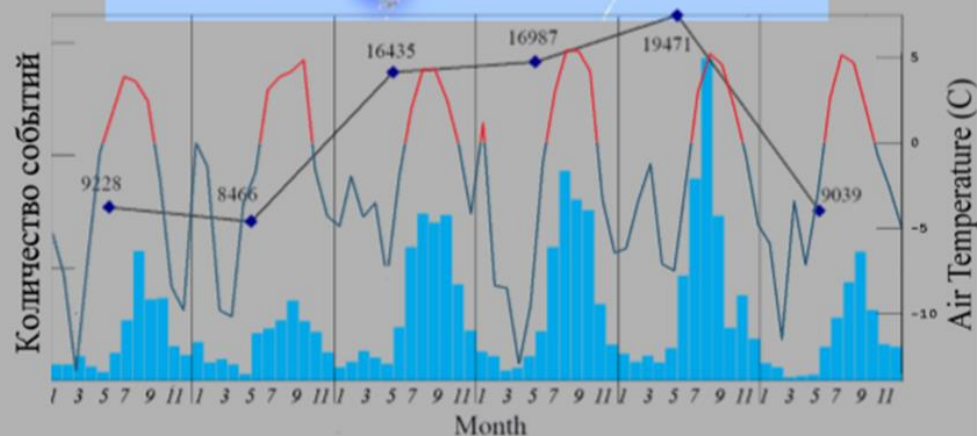
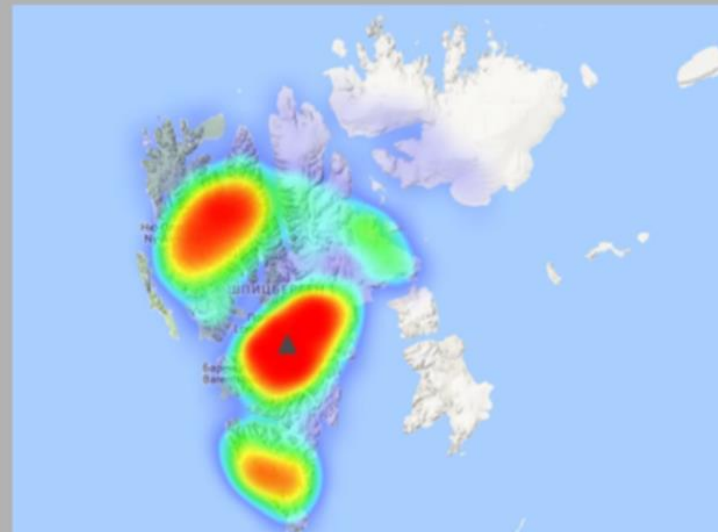
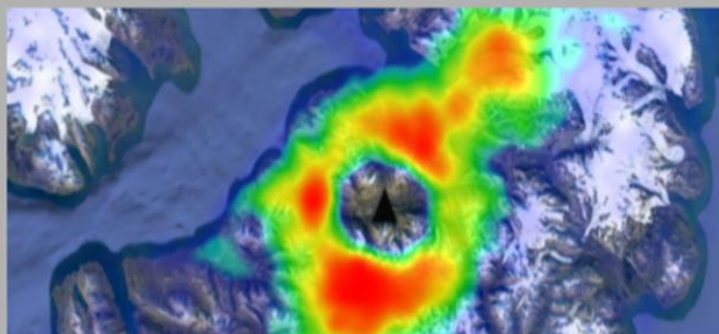
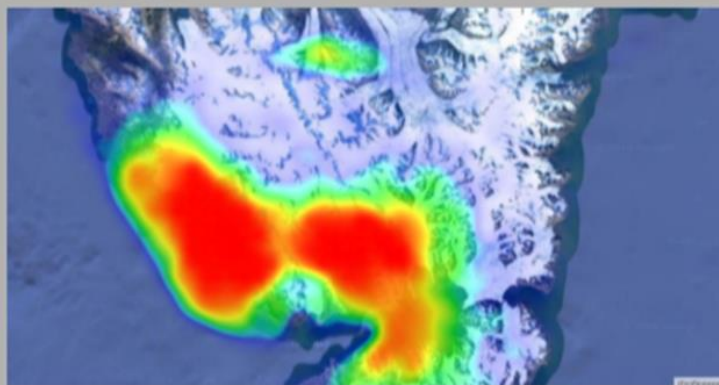
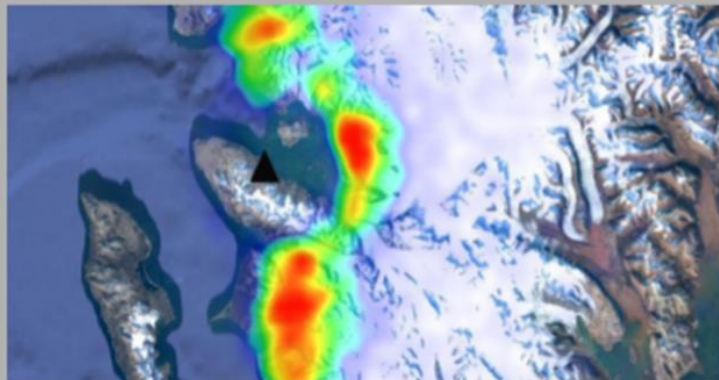


● Microphone ▲ Seismic Station 🏠 PGI Observatory



● Microphone ▲ Seismic station

Непрерывный круглогодичный мониторинг льдотрясений

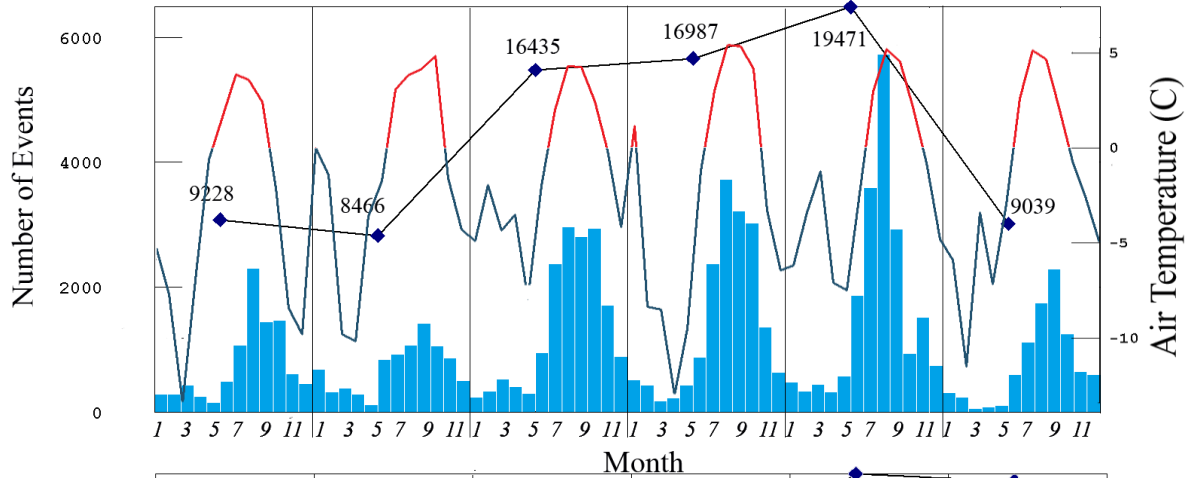


Разработанные методы сейсмического и инфразвукового мониторинга деструкции криосферы позволяют выполнять круглогодичные наблюдения за интенсивностью разрушения ледникового покрова и выявлять наиболее «горячие» районы

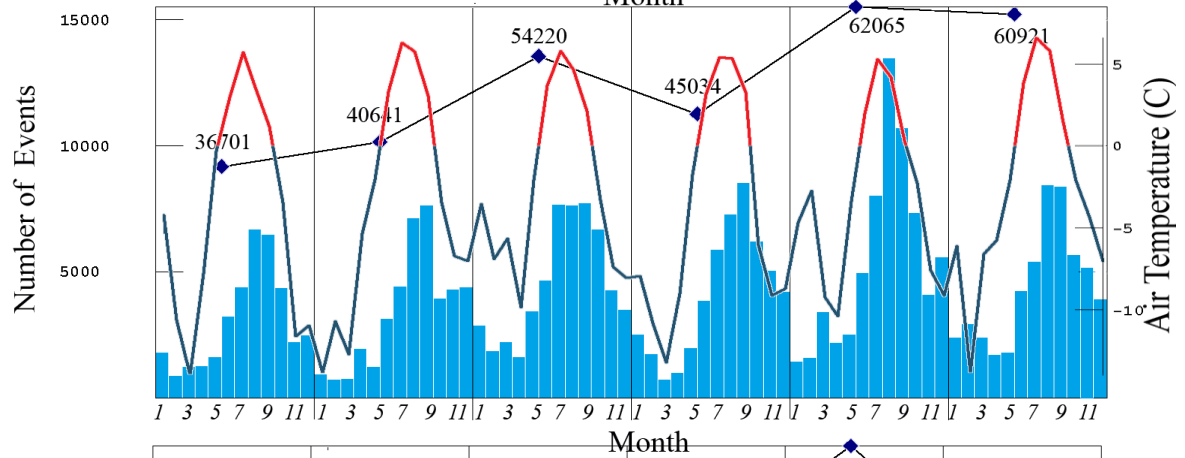
Количество сейсмических событий

2010 2011 2012 2013 2014 2015

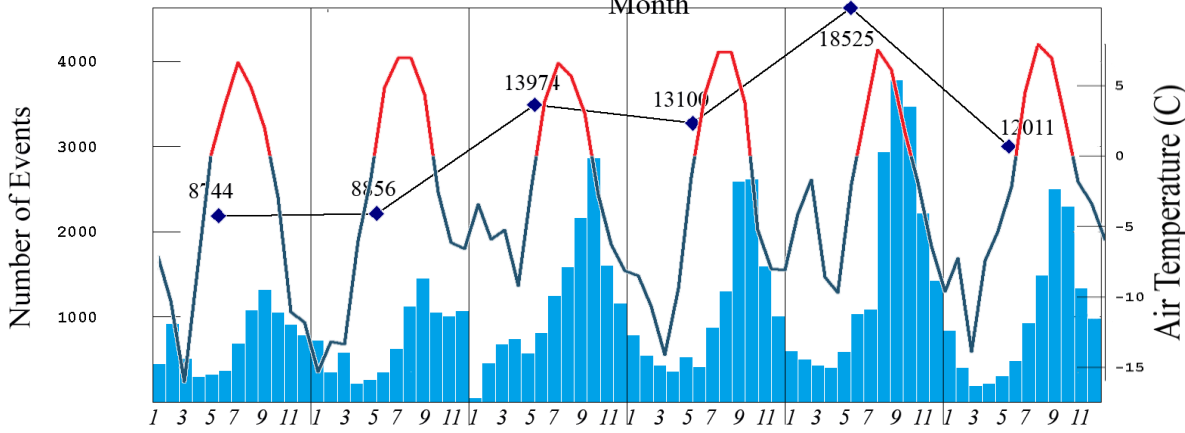
HSPB



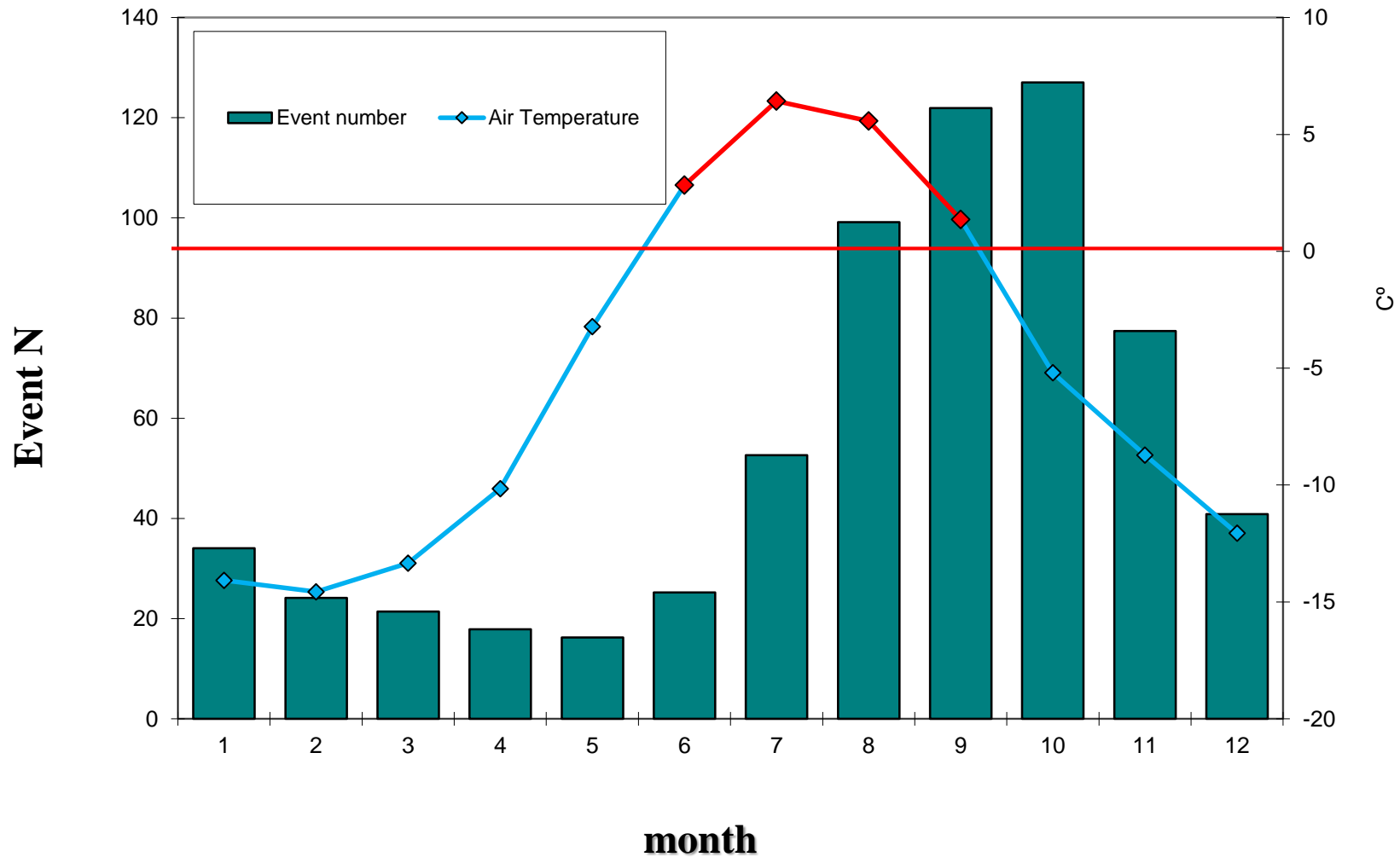
KBS



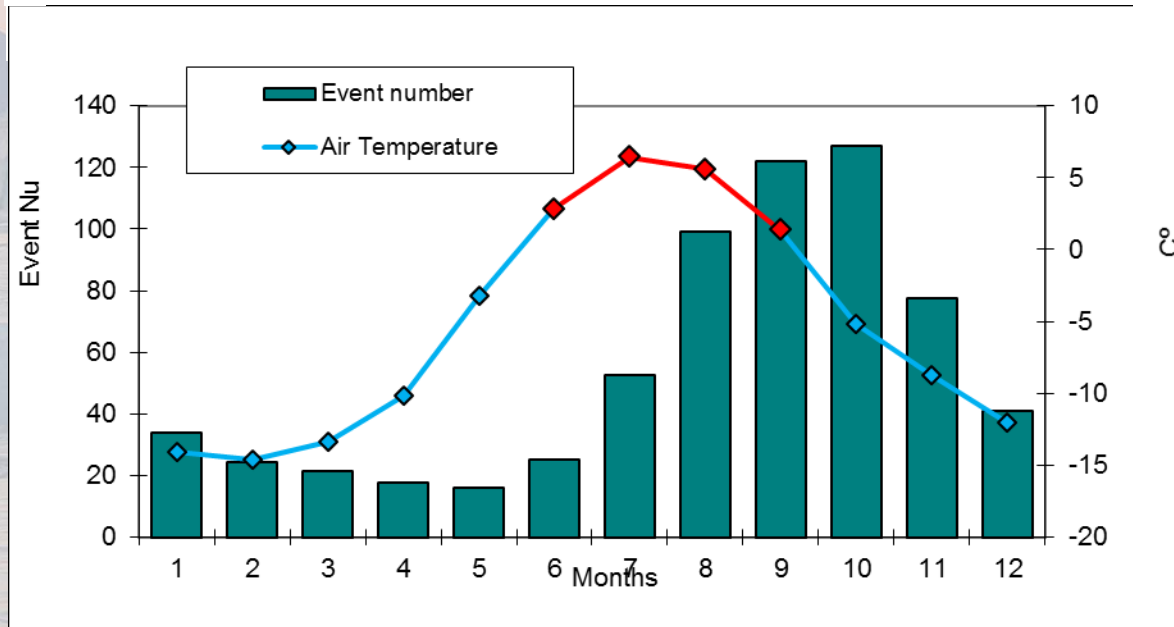
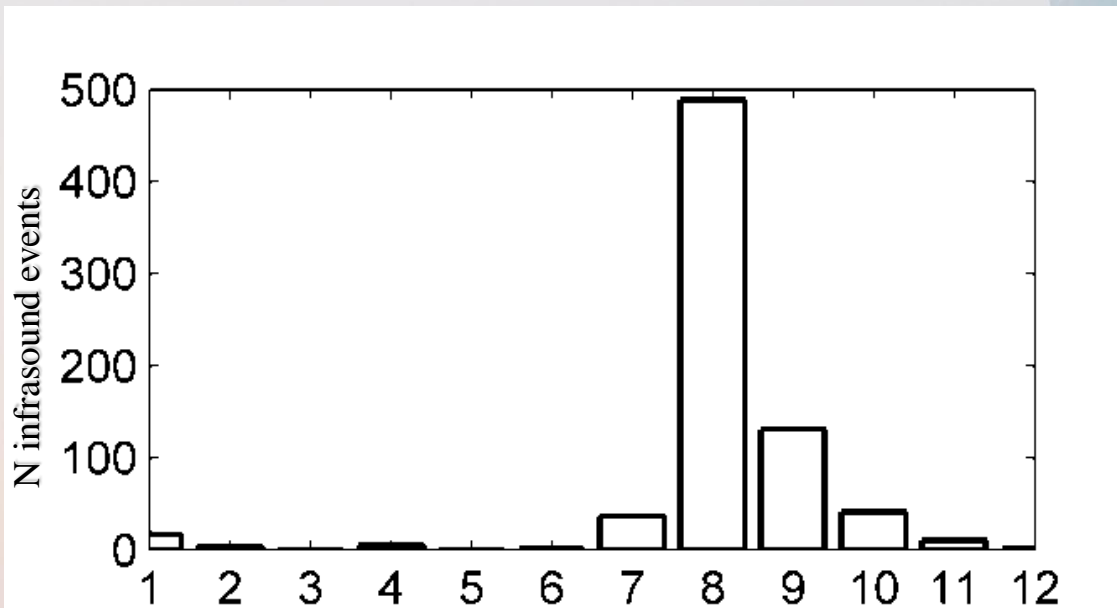
SPI



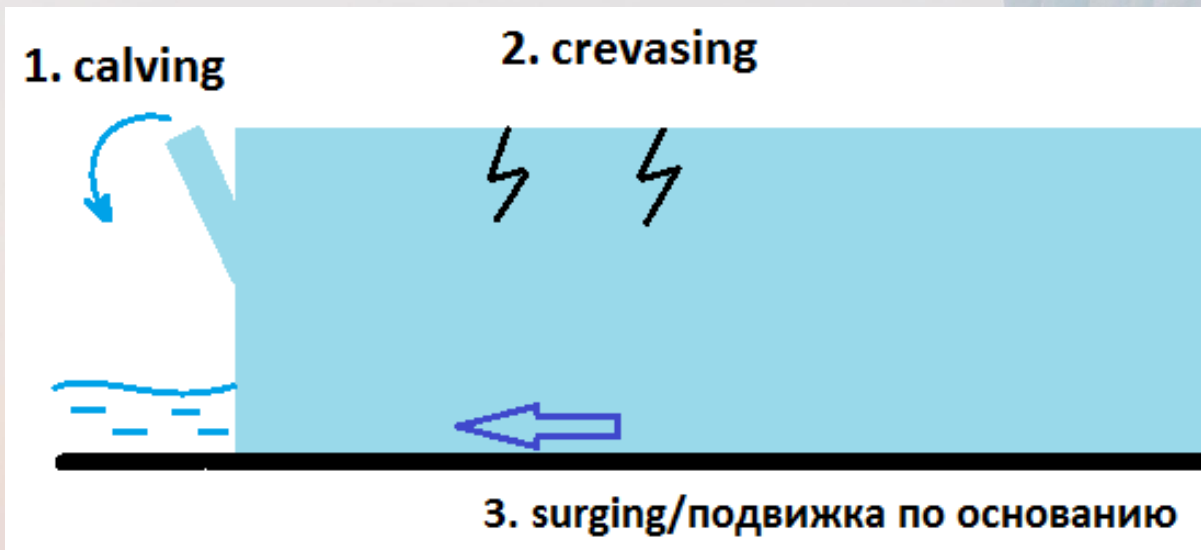
Сезонный характер сейсмичности для событий с $1 \leq M_L \leq 2,2$



Среднемесячное количество инфразвуковых событий за период 2011-2015 г.г.



Источники сейсмических и акустических волн



1. калвинг



2. растрескивание



3. подвижка

Комплекс для контроля движения ледников



1 – сейсмоинфразвуковая станция BRBB

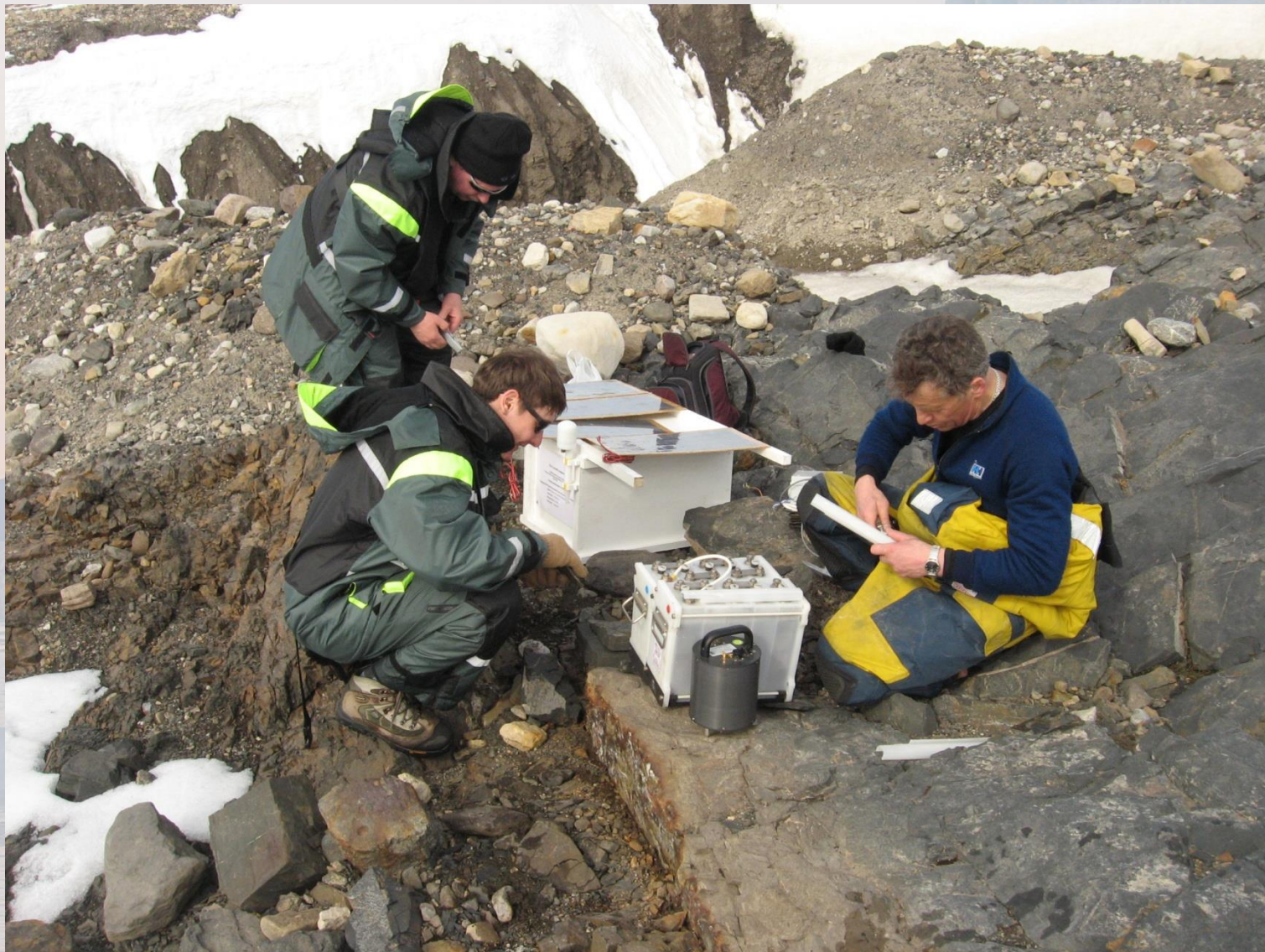
2 – GPS-станция (на поверхности ледника)

3 – временная сейсмическая станция

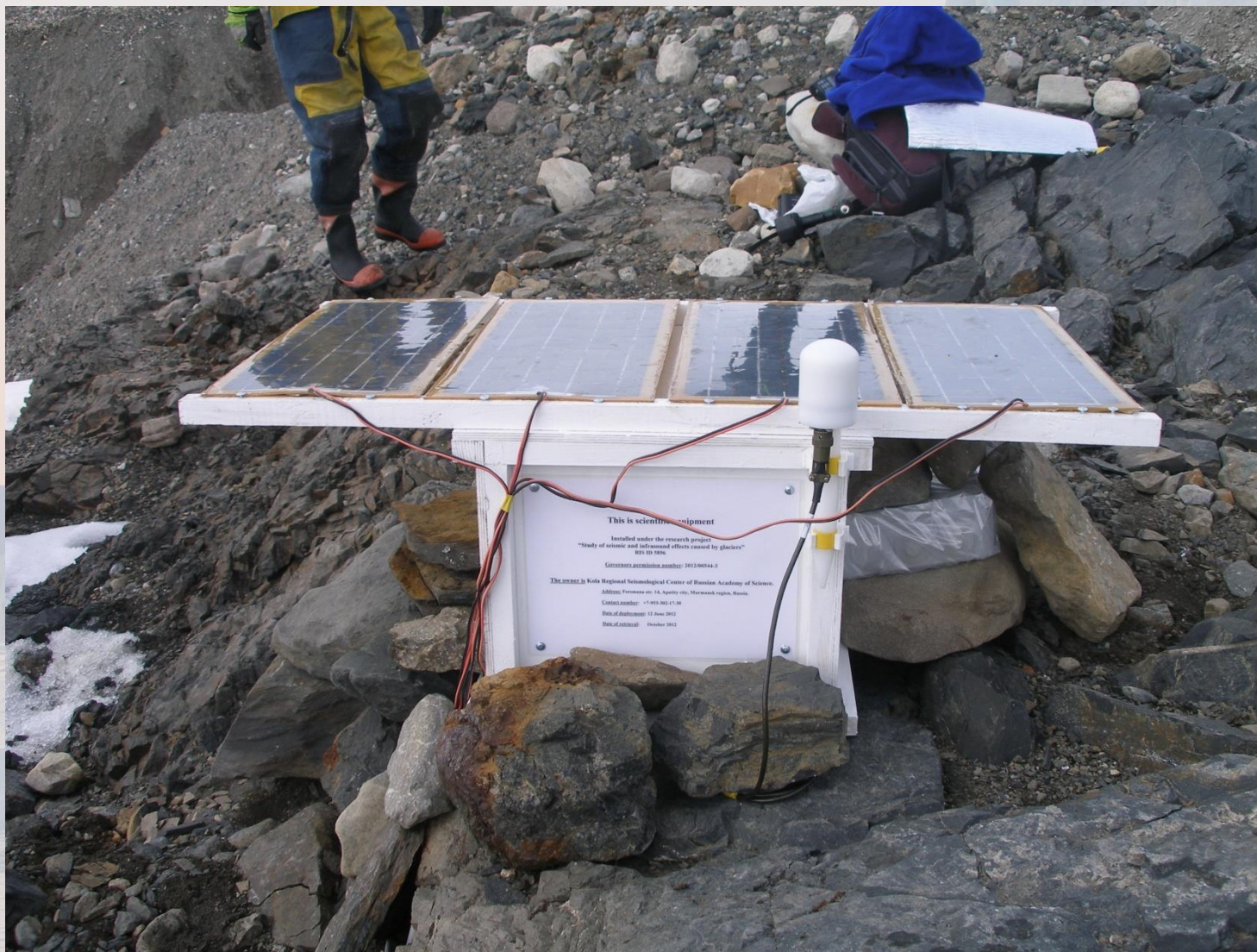
Пульсирующий ледник Эсмарк



Временная сейсмическая станция



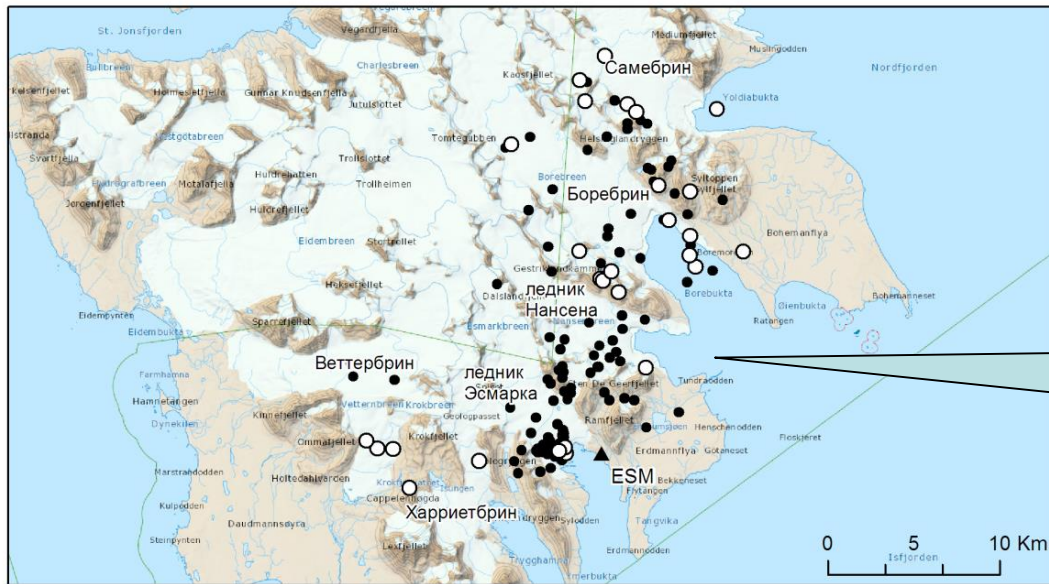
Временная сейсмическая станция



GPS-станция на поверхности ледника



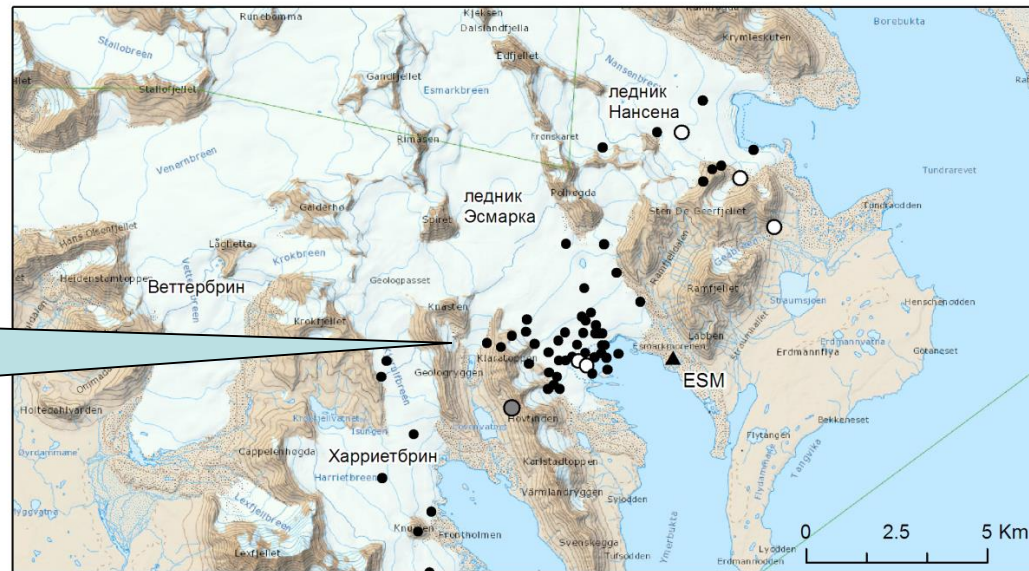
Льдотрясения на леднике Эсмарк



Сейсмические события не вызвавшие инфразвук

ML • -2.1 - -0.5 ○ -0.5 - 0 ● 0 - 0.07 ▲ 3-х компонентная станция

Сейсмические события, сопровождавшиеся инфразвуком

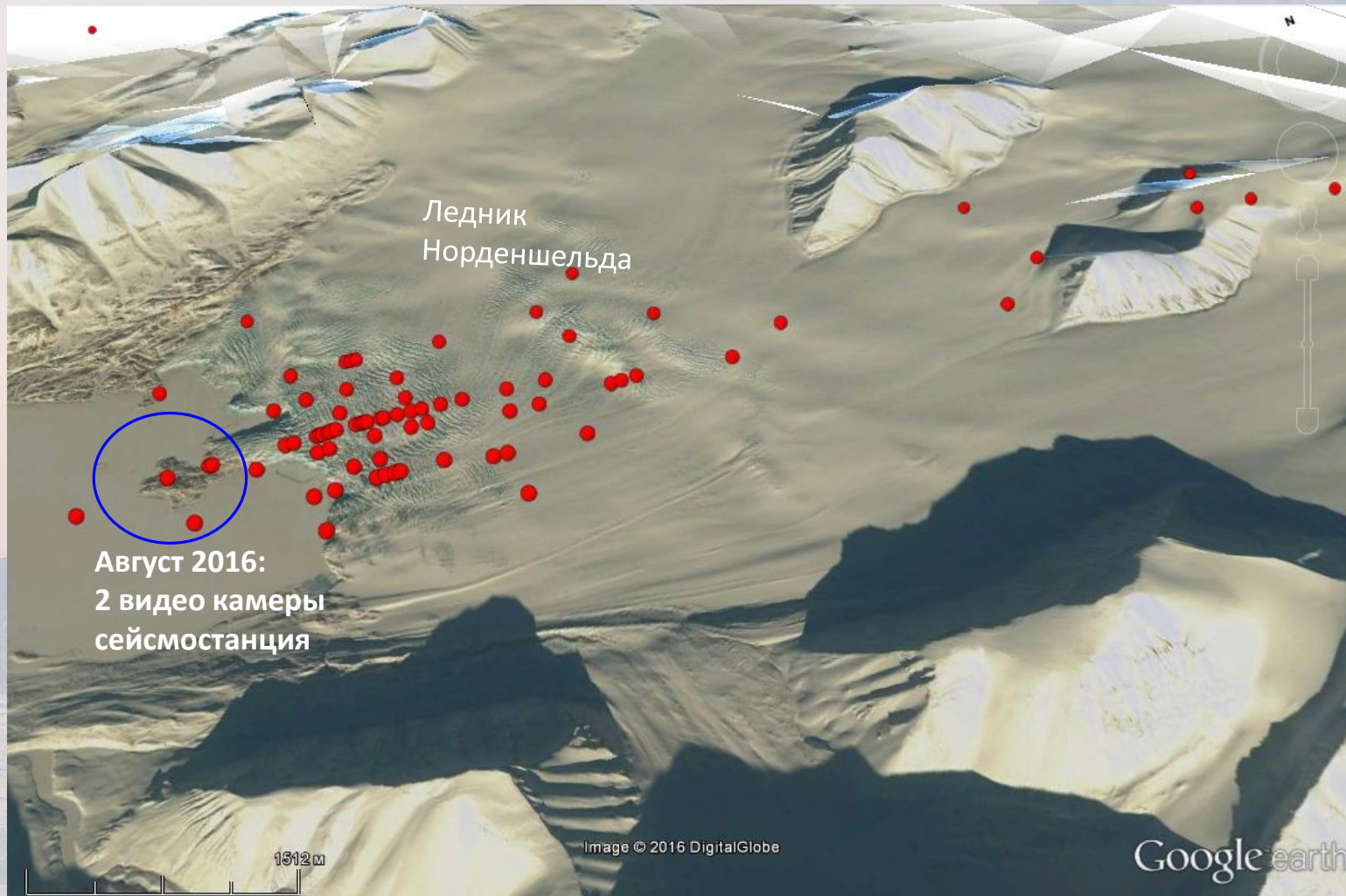


ML • -1.6 - -0.5 ○ -0.5 - 0 ● 0 - 0.03 ▲ 3-х компонентная станция

Льдотрясения на леднике Норденшельда



Эпицентры на краю ледника предположительно калвинговые события, на теле - кревайзинг.



Следующий шаг – связать особенности сейсмической и акустической записей с природой событий для определения типа источника (калвинг, кревайзинг и т.д.)

Оборудование для видеонаблюдения

2 видео камеры, оснащенные GPS-приемниками, для непрерывной регистрации

Видео-камера, направленная на ледник

GPS приемник

Лед. Норденшельда



Источник энергии – аккумулятор





78.6523N 000km/h
016.9211E

17/08/2016
07:02:25

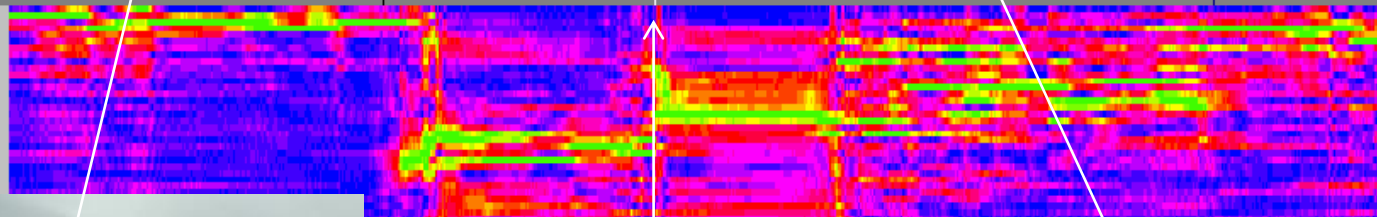
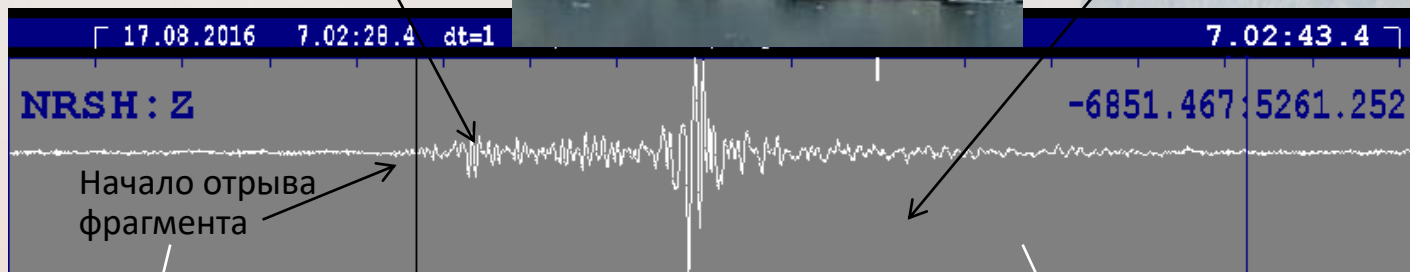
Сейсмограмма обрушения

Запись сейсмостанцией NRSH
вблизи Ледника



Отрыв фрагмента

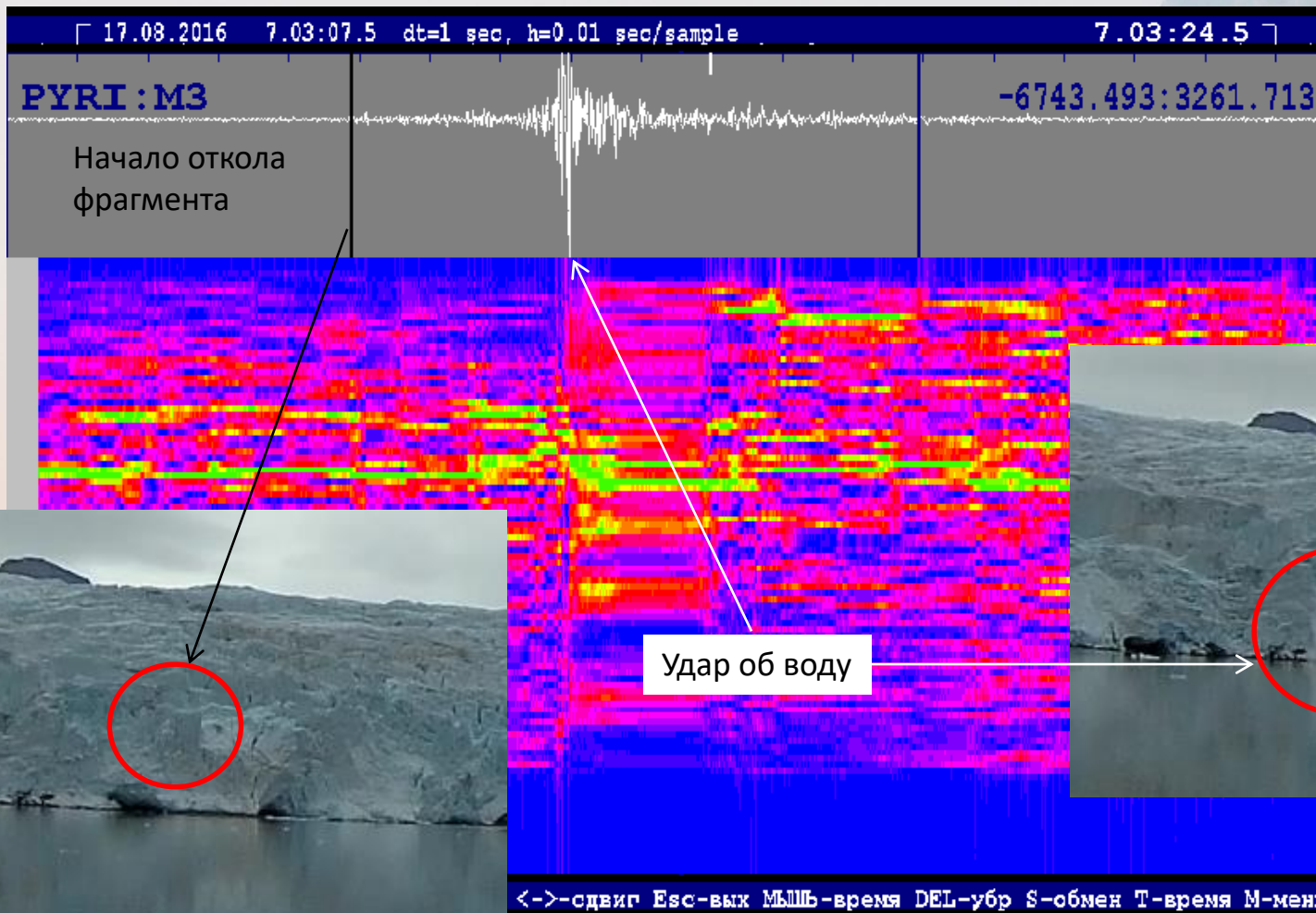
Осыпание мелких обломков +
отраженные волны от дна –
поверхность воды



Удар об воду



Инфразвук, откол края ледника



Запись инфразвуковой группой PYR в Пирамиде

Сейсмограмма – откол 2-х фрагментов

17.08.2016 7.10:40.8 dt=1 sec, b=0.01 sec/sample

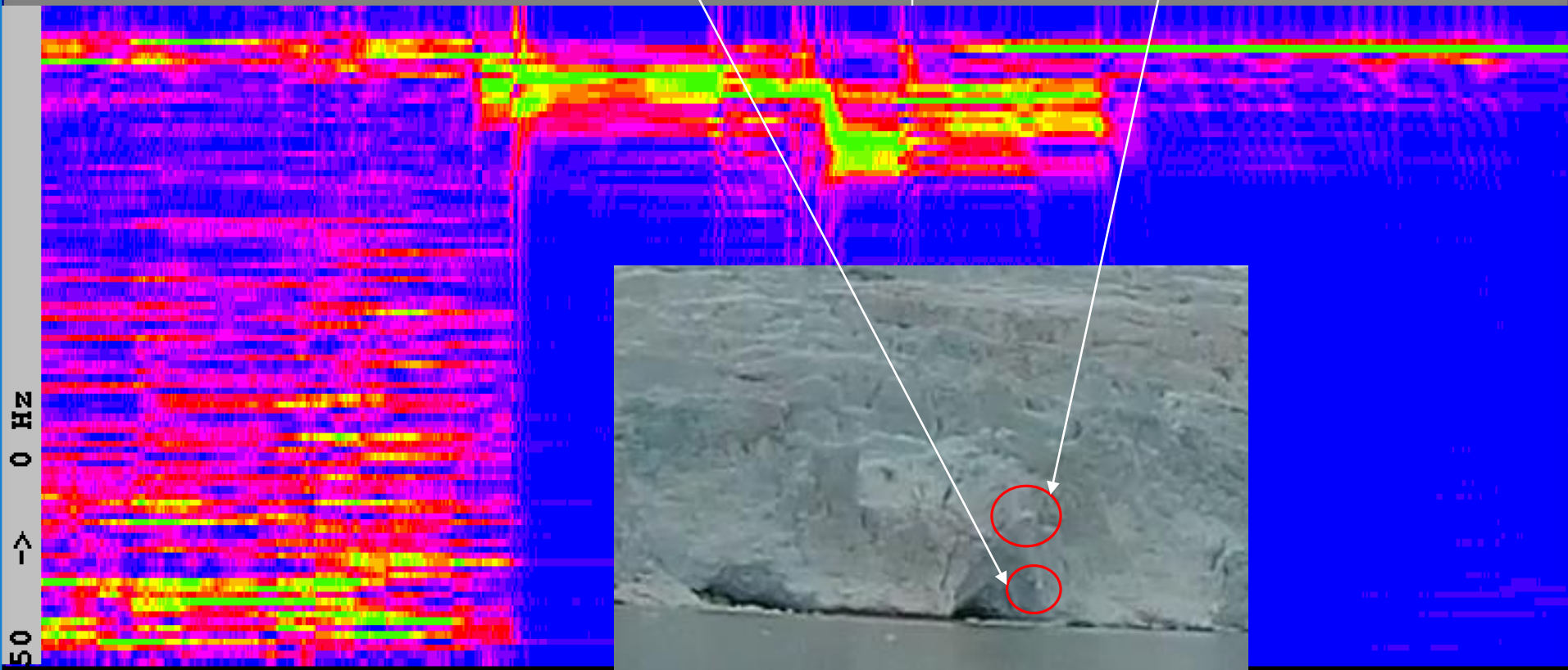
7.10:54.8

NRSH: Z Начало обрушения

-9368.59:9084.109

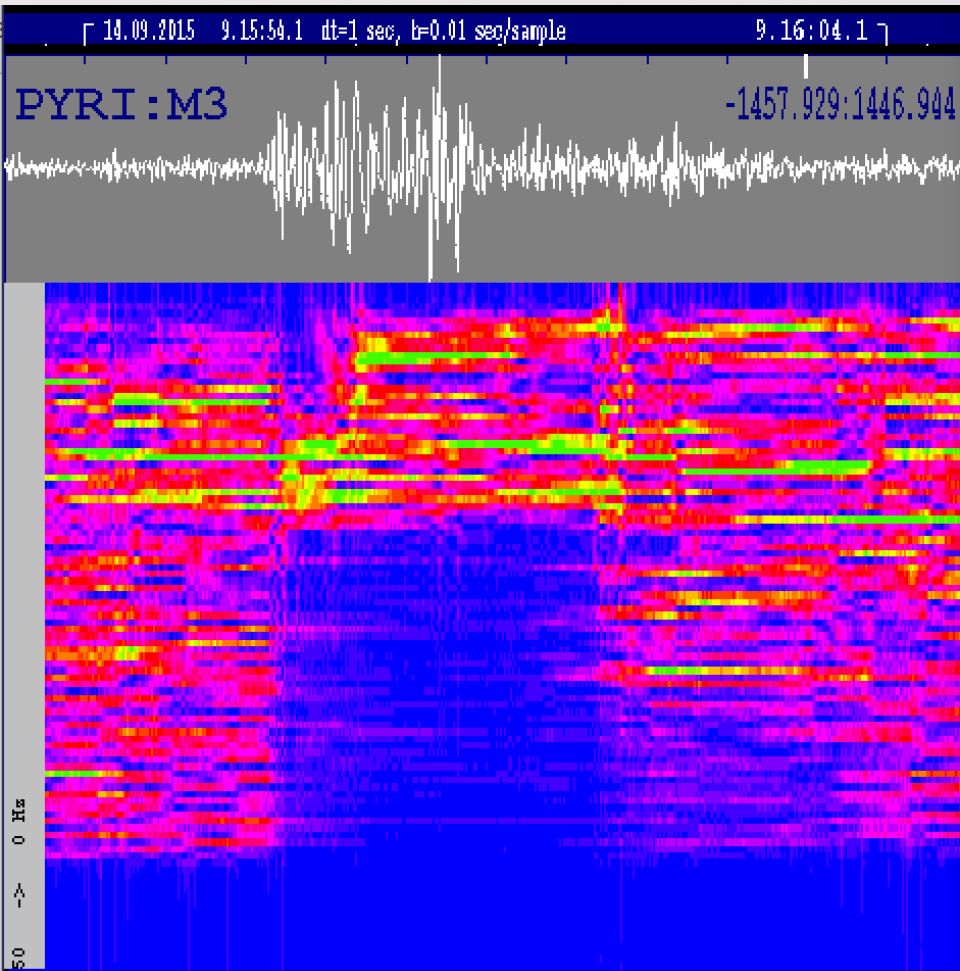
1 кусок упал

2 кусок упал

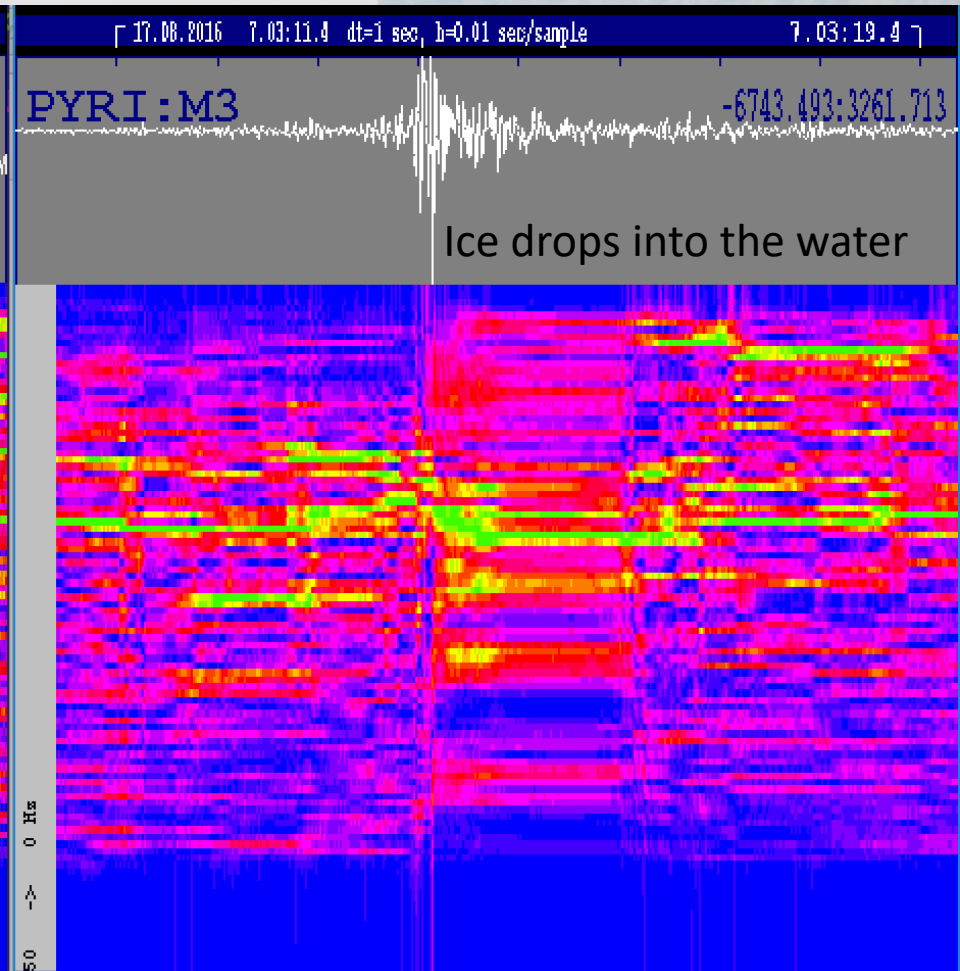


Льдотрясение на теле Норденшельда

Обрушение края Норденшельда

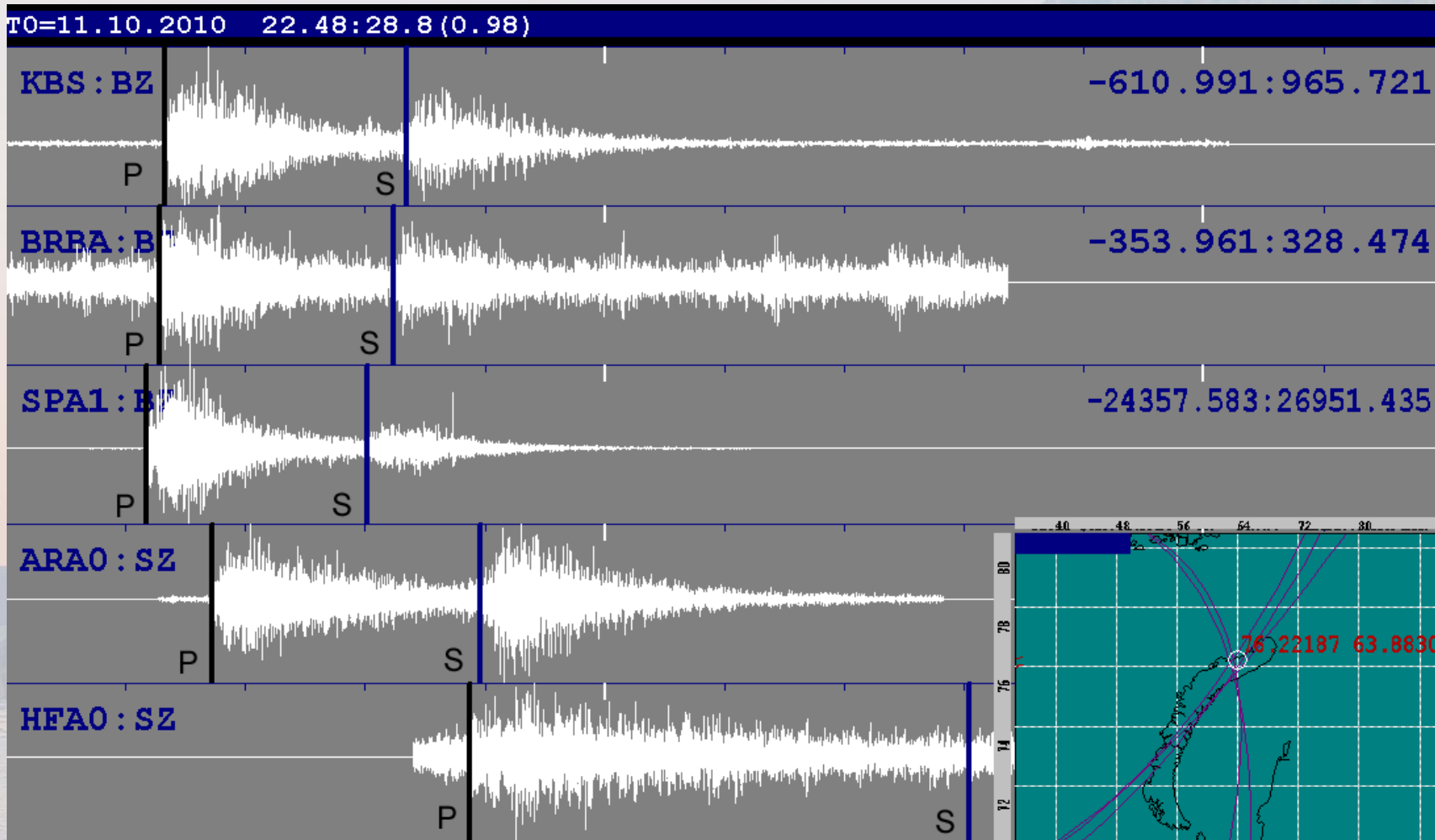


«Широкая «волновая» форма



Импульсный сигнал с четким моментом падения куска льда в воду

Сейсмическое событие с $M=4,24$



Сейсмическое событие, зарегистрированное на западном побережье Северного острова Новой Земли 11 октября 2010 года в 22:40:00.0 GMT в точке с координатами 76.2220 С.Ш и 63.8830. Магнитуда M_L была оценена по данным сейсмостанций КФ ГС РАН и НОРСАР на уровне 4.24

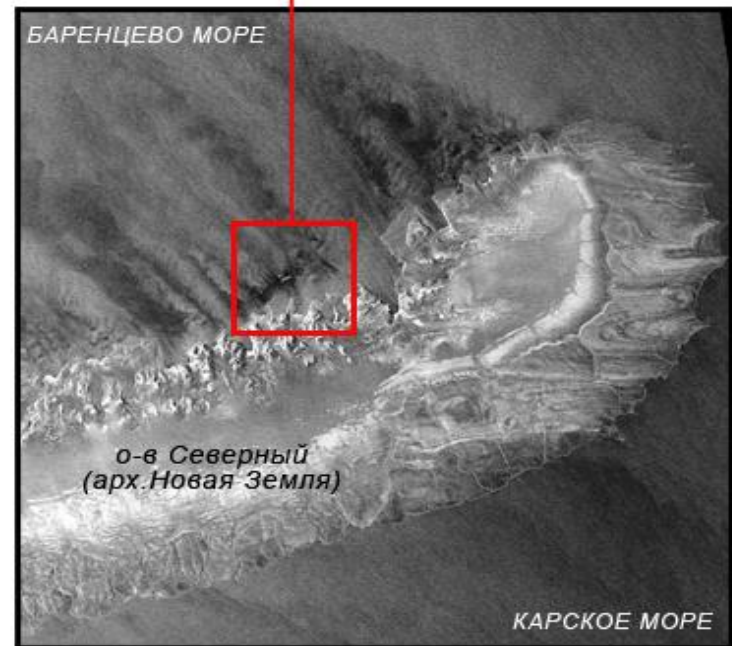
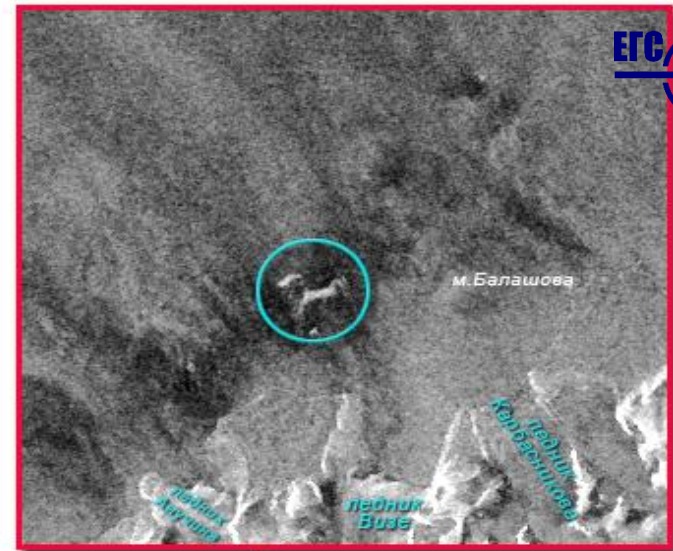
Анализ ледовой обстановки, выполненный НИЦ космической гидрометеорологии «Планета»

«Обнаружены 2 айсберга,
крупный размером 0,8*4 км»
Примерный вес - 150 млн. тонн



ИСЗ ENVISAT/ASAR 10 октября 16:26 GMT

Рис. 4. Спутниковый снимок района эпицентра, сделанный 10.10.2010



ИСЗ ENVISAT/ASAR 13 октября 16:35 GMT



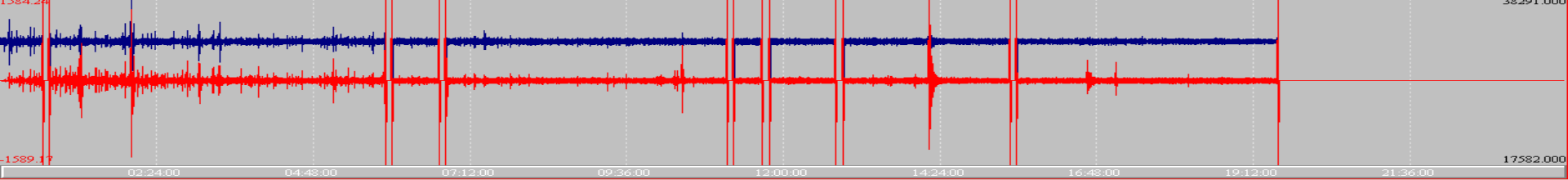
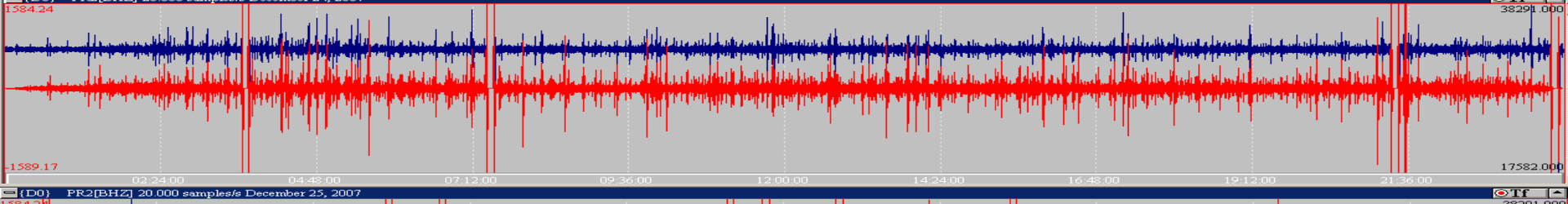
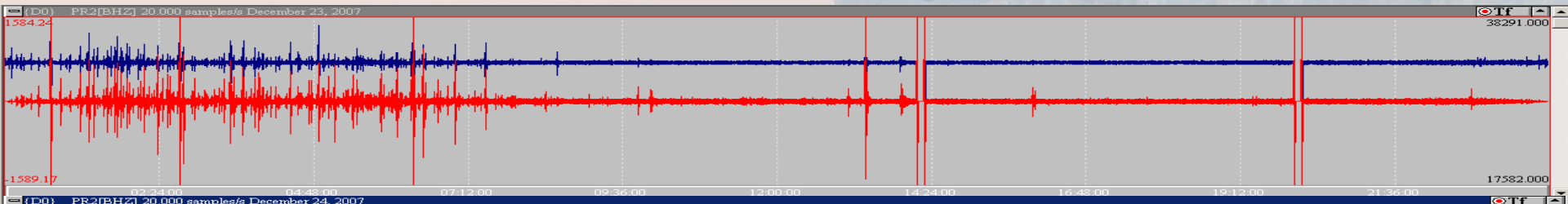
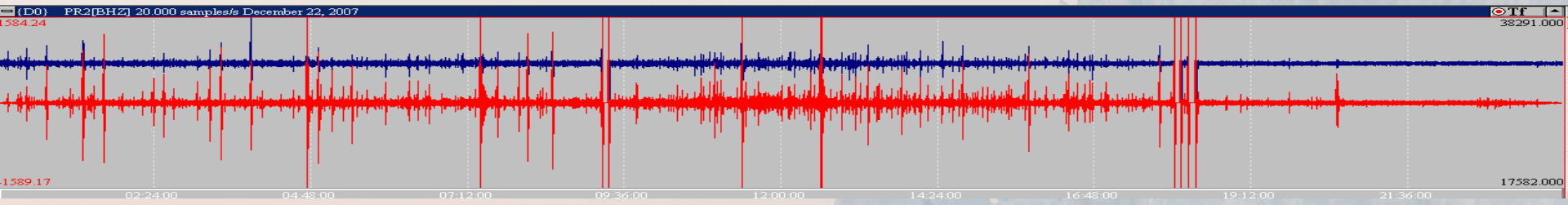
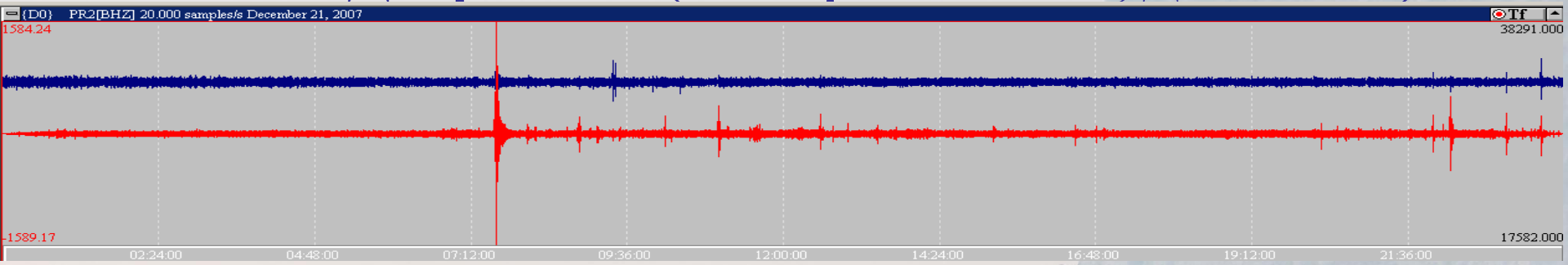
- район обнаружения группы айсбергов,
образовавшихся от выводных ледников о. Северный

Морозобойные удары



Особая группа сотрясений грунта вызываемых действием быстрого замораживания влагонасыщенных грунтов или ледовых покровов при резком падении зимних температур, что нередко случается в средних и высоких широтах Евразии.

Примеры суточных интервалов сейсмических записей на с/с «Добрянка» (По Варлашова Ю., Дягилев Р.)

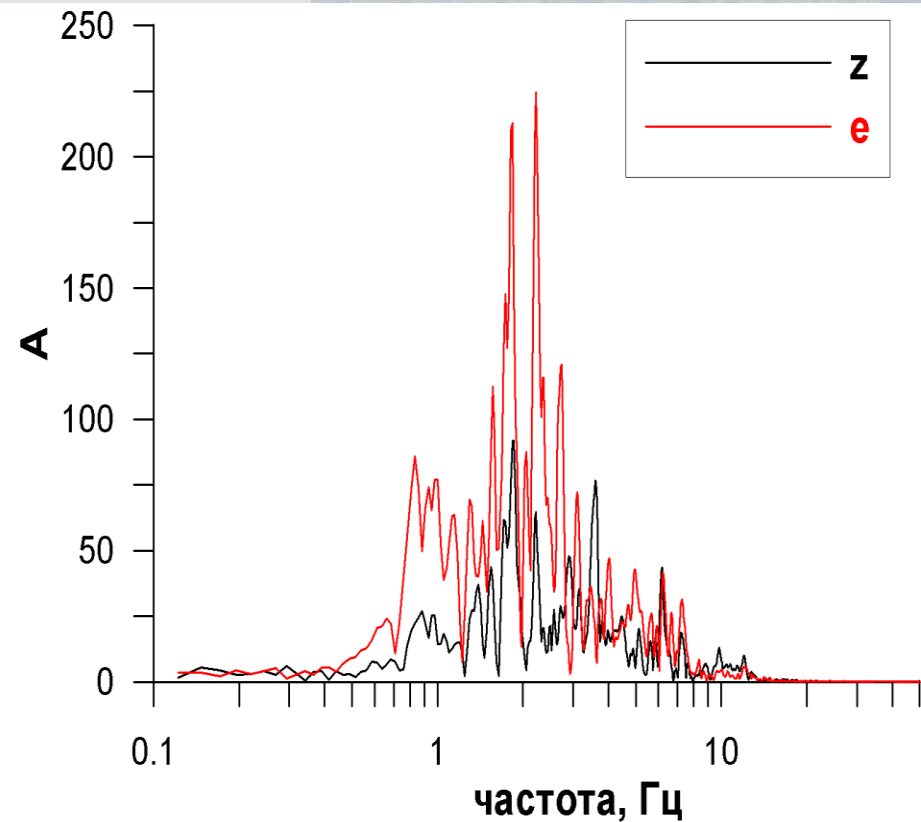
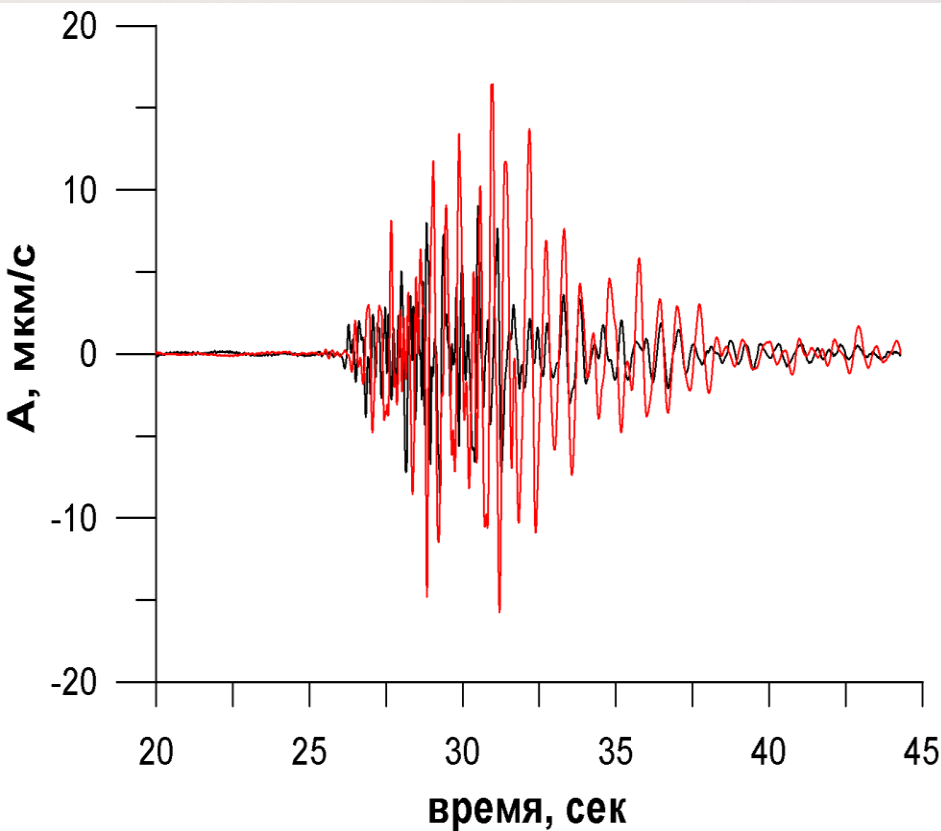


Для подобных событий характерны следующие особенности:

- события фиксируются только одной ближайшей сейсмостанцией «Добрянка»; другие сейсмостанции – «Екимята» (40 км), «ВЧ. Городки» (60 км), «Романово» (90 км) – эти события не регистрируют;
- частотный состав сигналов имеет диапазон от 1 до 10 Гц;
- вступления Р и S волн четкие, определение эпицентра затруднено;
- длительность сигналов – первые секунды и первые десятки секунд;
- амплитуда на горизонтальных компонентах больше чем, на вертикальной;
- магнитуда варьируется в диапазоне от -2.5 до -1.
- (По Варлашова Ю., Дягилев Р.)

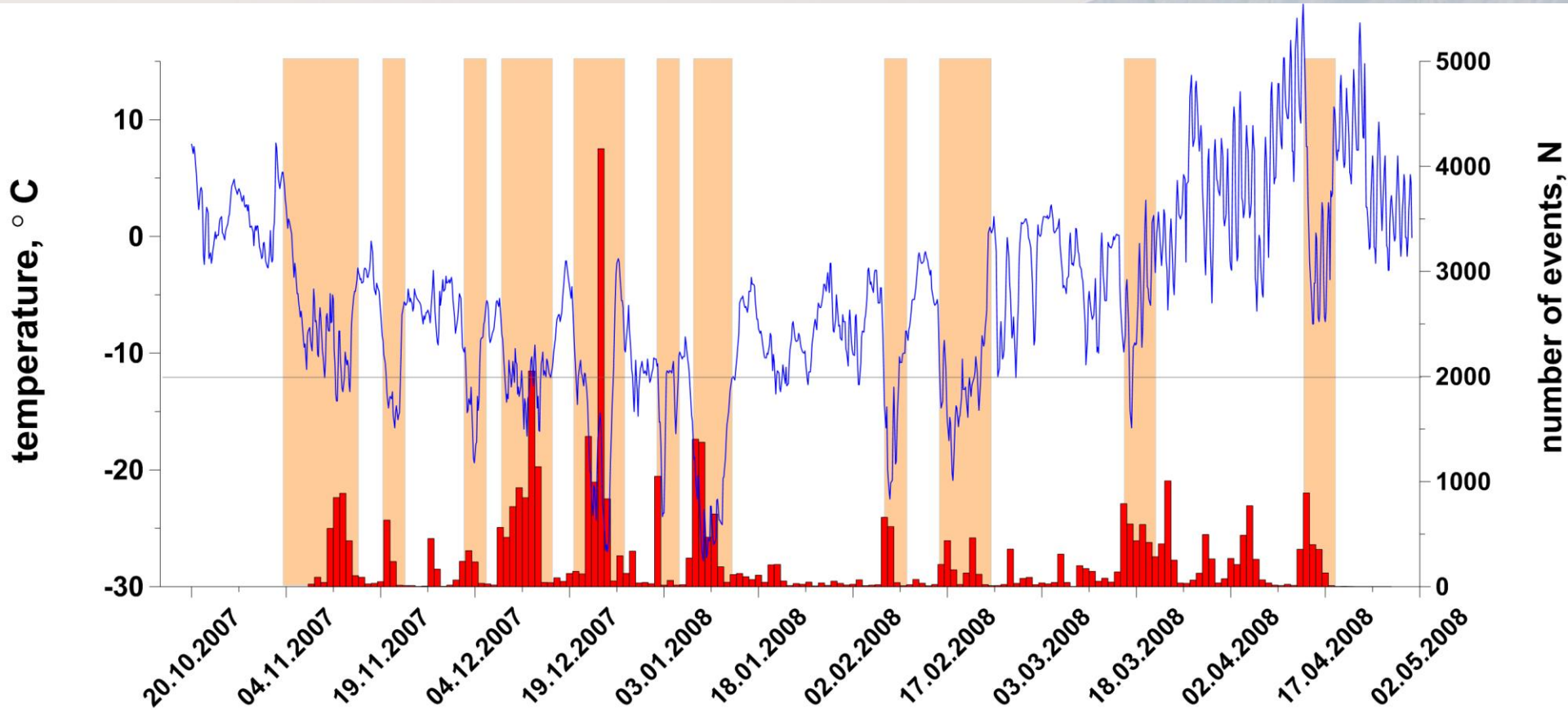
Пример записи события неизвестной природы сейсмостанции «Добрянка» на вертикальной (Z) и горизонтальной (H) компонентах и соответствующие им амплитудные спектры

компонентах и соответствующие им амплитудные спектры

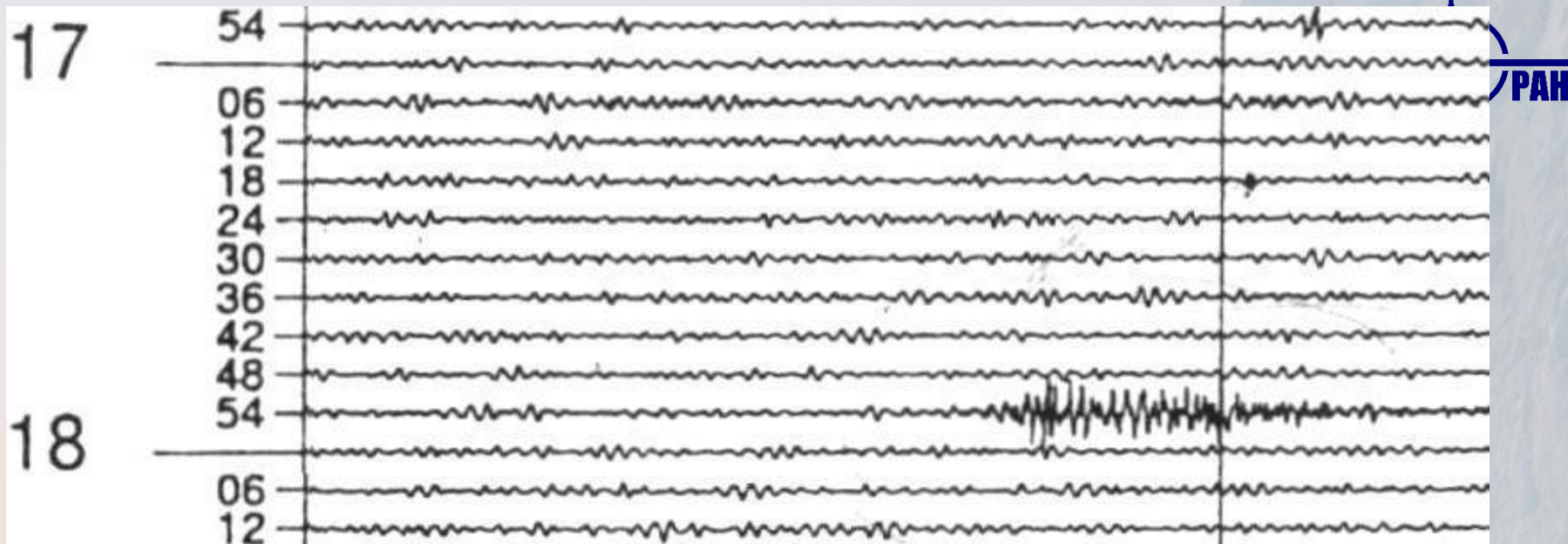


(По Варлашова Ю., Дягилев Р.)

Сопоставление количества морозобойных ударов с графиком температуры в районе г. Добрянка



(По Варлашова Ю., Дягилев Р.)



Сейсмограмма станции Мааселка (MSF) морозобойного удара 24 декабря 2003г. в районе пос. Калевала на оз. Средние Куйто (по Шаров Н.В., 2014)

- Об энергетических характеристиках морозобойных явлений на суше ввиду отсутствия специальных исследований (кроме единичных на льду озер) известно крайне мало. Пока можно только отметить отсутствие сведений о морозных ударах с энергией, соответствующей $M \geq 2$. Однако ввиду возникновения таких толчков у самой поверхности земли, их макросейсмический эффект определяется III–IV балла (на льду Байкала), до IV–V баллов в Карелии (на берегу озера), а в некоторых исторических случаях, по-видимому, доходил локально и до V–VI и единично, до VII баллов. Эффекты же в виде растрескивания среды в сухопутных условиях, предусматриваемые в макросейсмических шкалах, нередко превышают указанные выше, и для оценок землетрясений как тектонических не должны использоваться. [Никонов А. А., 2010 г.]

Исследования по изучению деструкции вечной мерзлоты



экологическая, техногенная, биогенная, социоэкономическая угрозы безопасности

Объемы метановых выбросов на шельфе Восточной Арктики сопоставимы с количеством метана, выделяемого водами всего остального Мирового океана

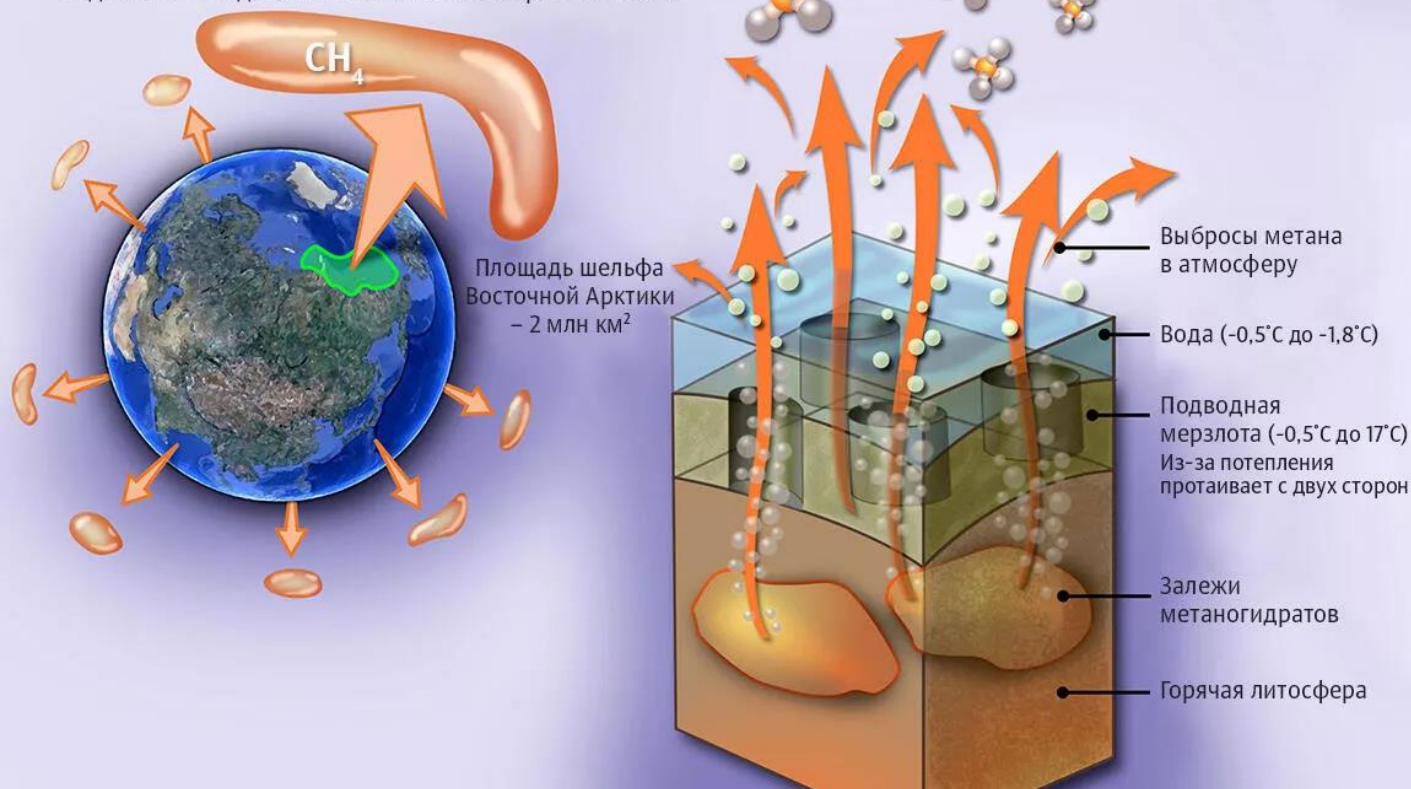


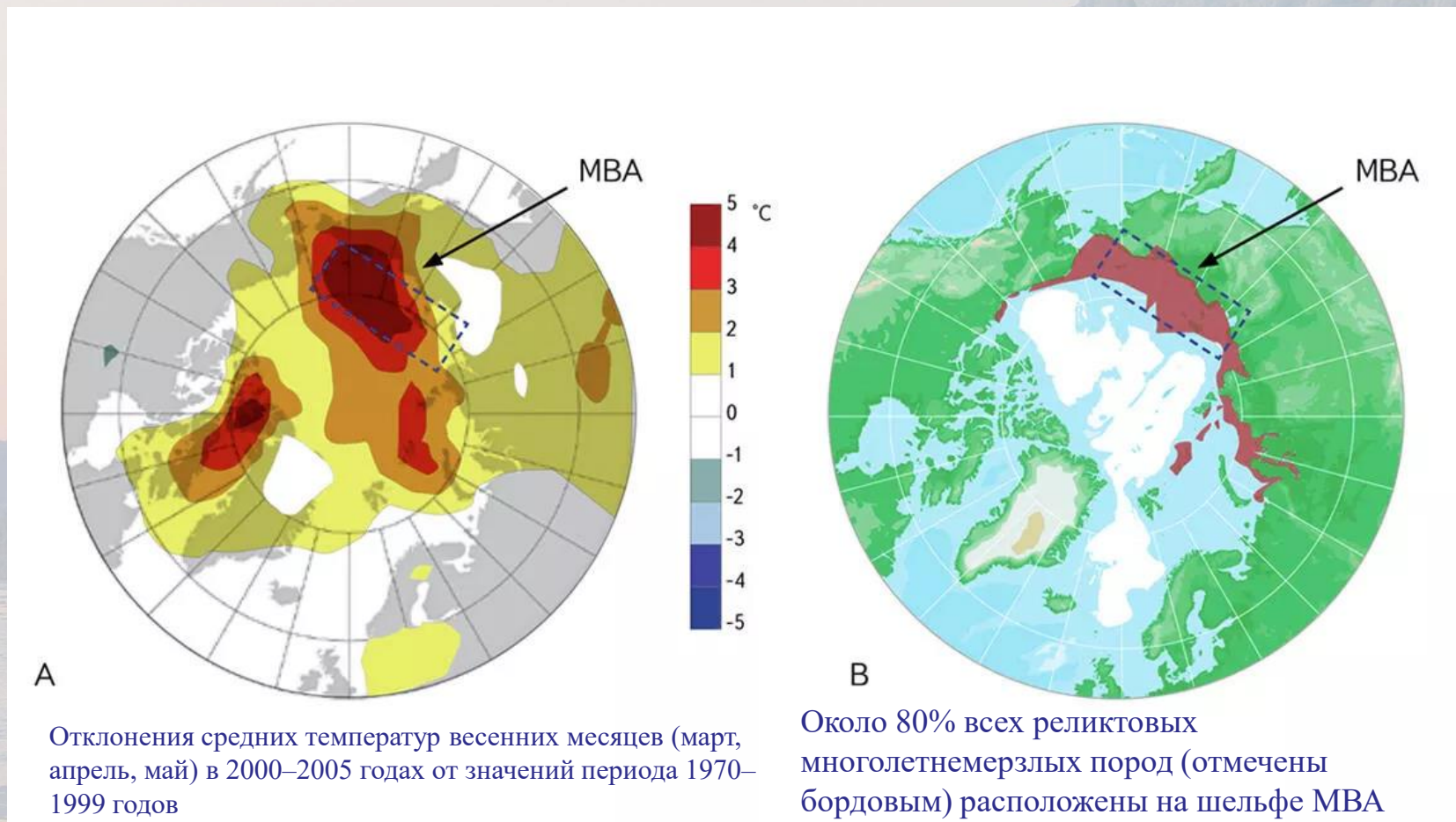
Схема образования метановых выбросов на шельфе Арктики по данным (Zina Deretsky, National Science Foundation, 2020)

По данным Национальной океанической и атмосферной администрации США (NOAA) в 2010—2019 гг. наблюдался средний ежегодный рост содержания **метана** в атмосфере около 7,5 млн.т В 2020 г., вопреки снижению объемов производства и выбросов парниковых газов, обусловленному пандемией COVID-19, прирост глобального содержания метана в атмосфере практически удвоился. Одним из основных объяснений роста объемов эмиссии метана в Арктике, является деградация многолетнемерзлых пород (ММП). Общие объемы выбросов метана на шельфе российских арктических морей ученые оценивают в 20 миллионов тонн в год. Согласно же докладам IPCC, весь остальной Мировой океан выделяет ежегодно около 5 миллионов тонн.

За последние 150 лет эмиссия метана увеличилась более чем в три с половиной раза.

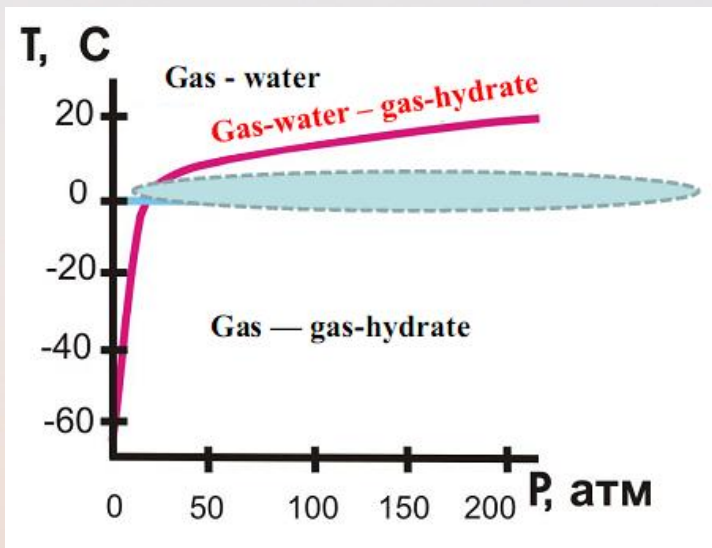
Частично сыграл роль антропогенный фактор, частично это ответ природных систем на общее потепление на планете, своего рода петля обратной связи.

Т.к. значительные объемы метана заключены в слоях многолетнемерзлых пород, а также в залежах газогидратов на шельфе арктических морей, а мерзлота, которую раньше называли вечной, в последние десятилетия тает ускоренными темпами, то и потепление в Арктике происходит в три-четыре раза быстрее, чем в остальных частях земного шара.



Положительные температурные аномалии над шельфом морей Восточной Арктики (МВА) совпадают с зонами распространения подводной многолетней мерзлоты. В. Источник – (NOAA / ACIA, 2005)

Газогидрат – кристаллическое вещество – соединение воды и метана, существующее в узком диапазоне температуры и давления.

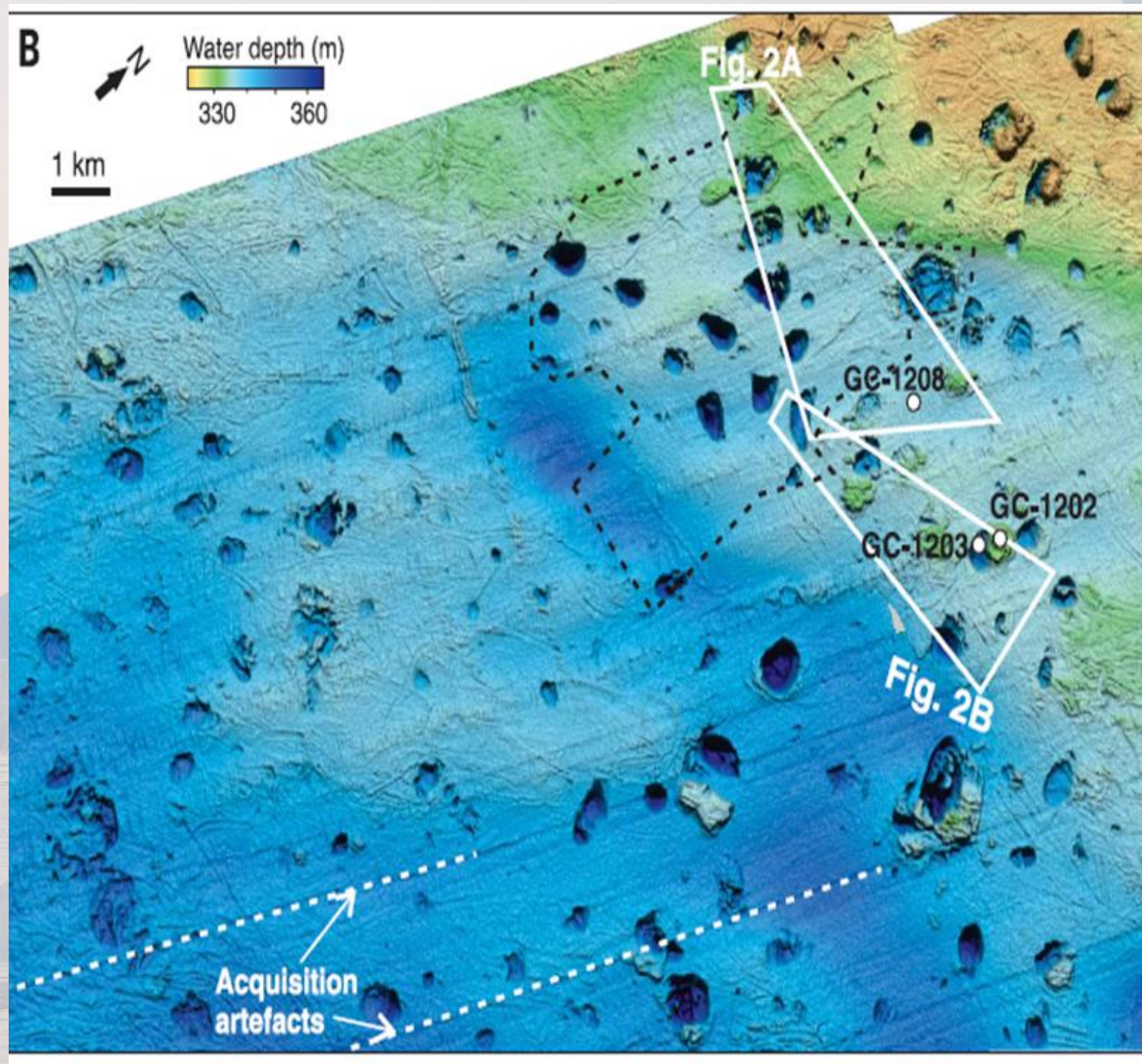


*Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш.,
Чиглинцева А.С. Газогидраты и
теплофизика // Материалы международной
конференции Геология морей и океанов
16-20 ноября 2009*



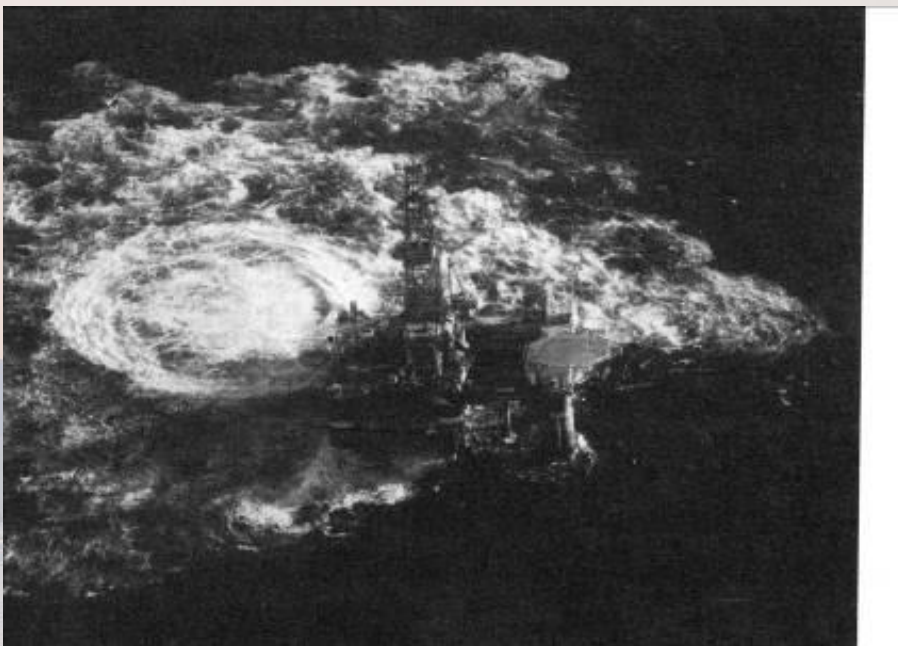
При разрушении газогидрата объем вещества увеличивается от 160 до 300 раз. Это увеличение при наличии непроницаемых глинистых покрышек приводит к возникновению на верхних этажах осадочного чехла газовых «пузырей», временами вырывающихся в водную толщу и формирующих грязевые вулканы, взрывные кратеры и покмарки.

Карта гигантских взрывных кратеров на шельфе Баренцева моря



Выброс метана и гигантский покмарк с затонувшим судном в Северном море

250 METERS GAS BULB



SINKED SHIP INTO GIANT POCKMARK

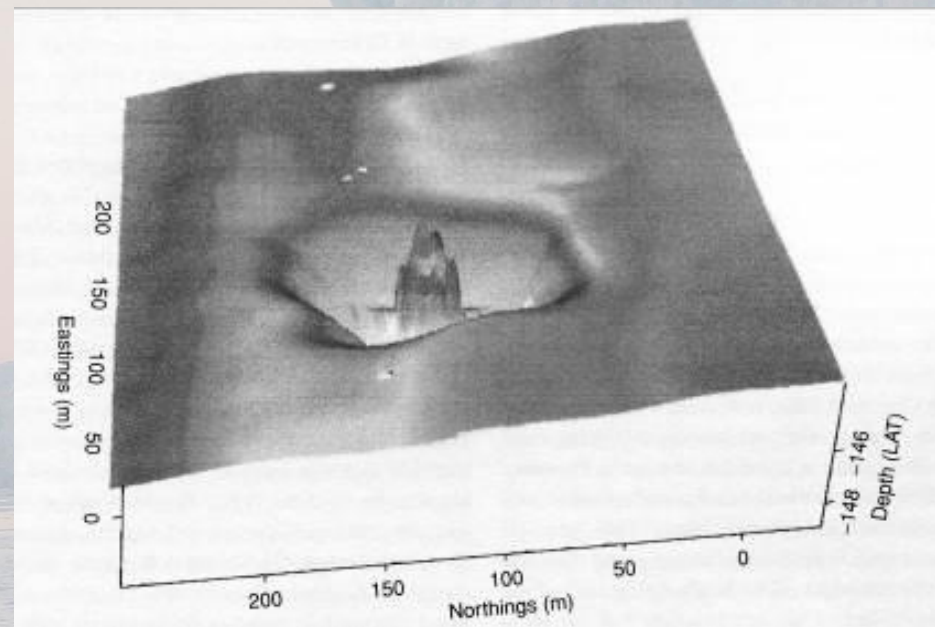
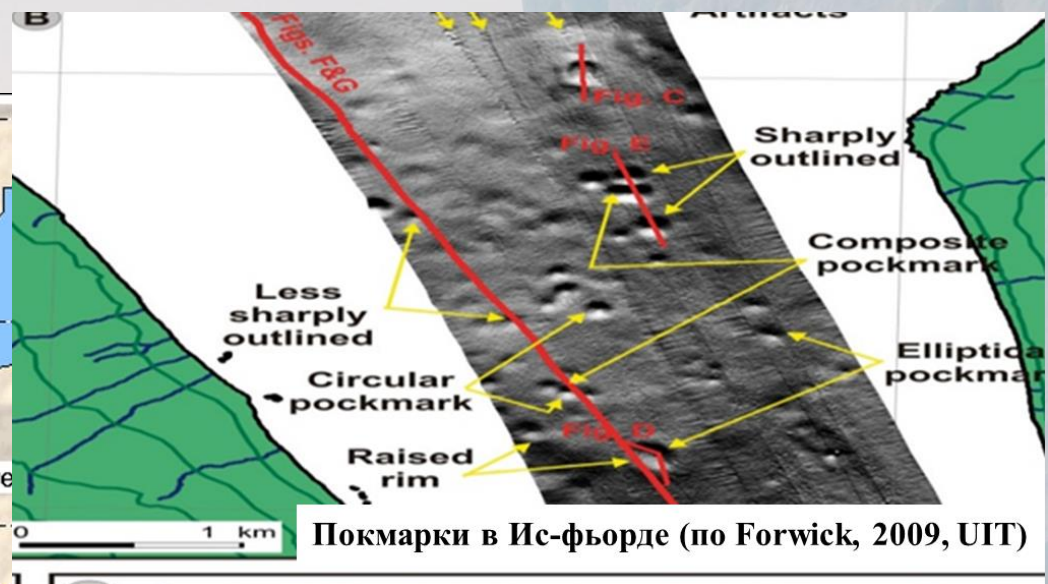
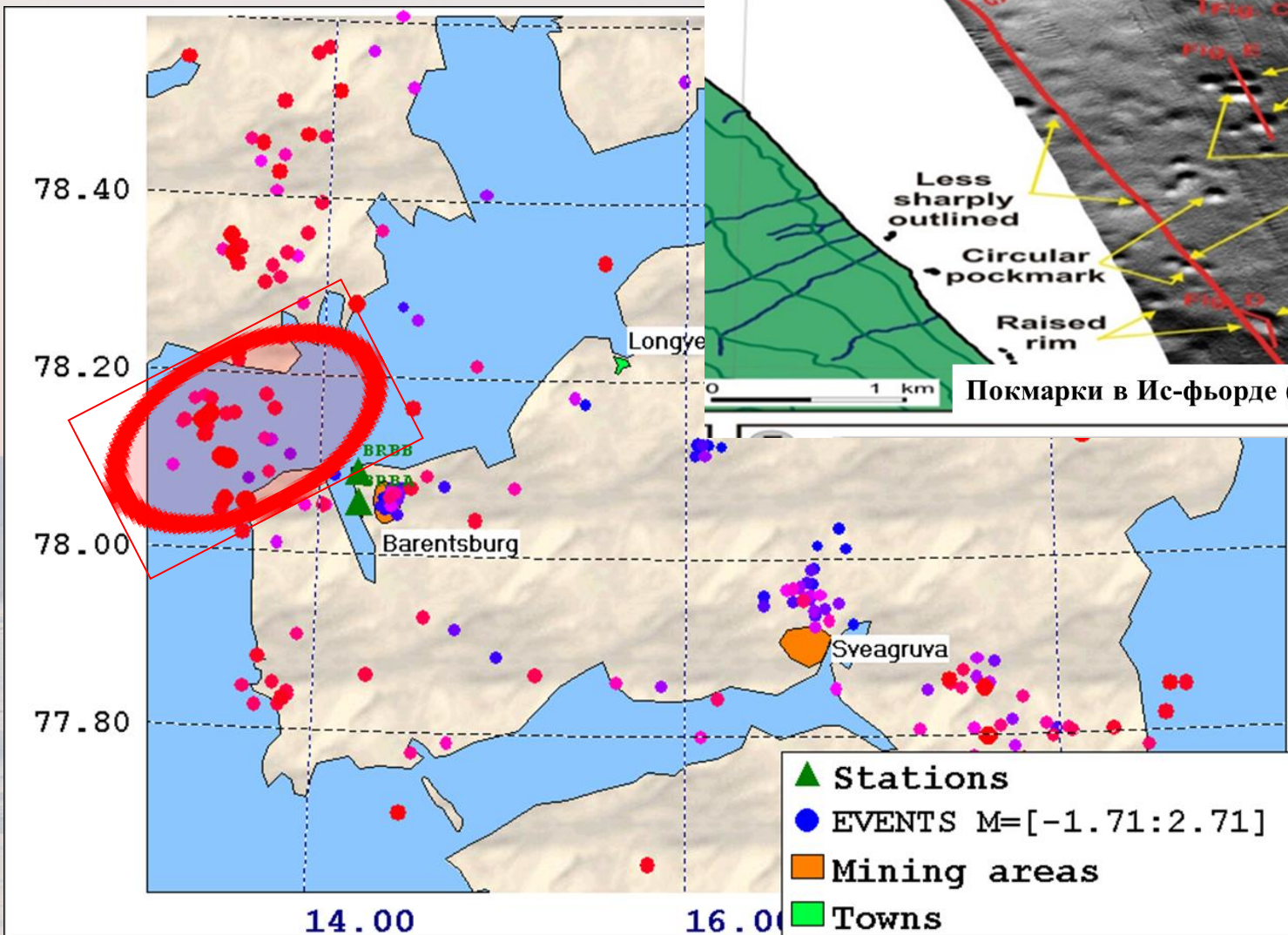
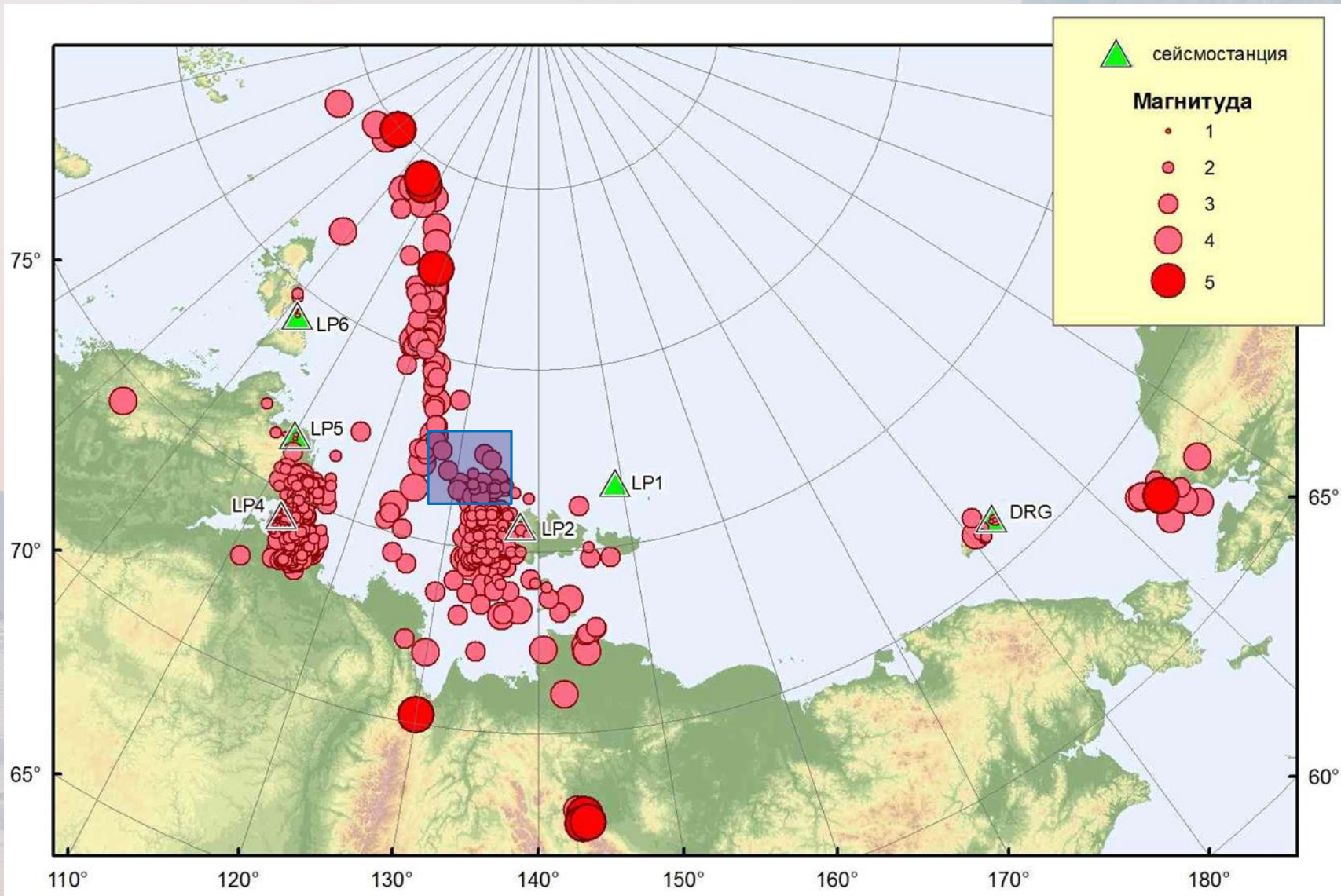


Фото из книги “Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment”, 2009, by Alan Judd & Martin Hovland.

Сейсмическая активность в заливе Ис-фиорд в 2010 году



Сейсмический режим в море Лаптевых в 2016 году



Сипы газа

Опасные газонасыщенные объекты на шельфе Арктики: море Лаптевых

ИССЛЕДОВАНИЯ

Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Лаптевых

Грузопоток по СМП 2021 г. - 34,85 млн т

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. 2021, том 500, № 1, с. 83–89

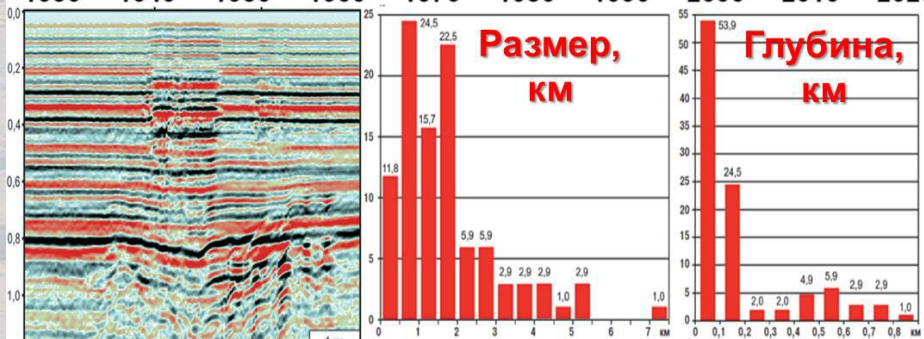
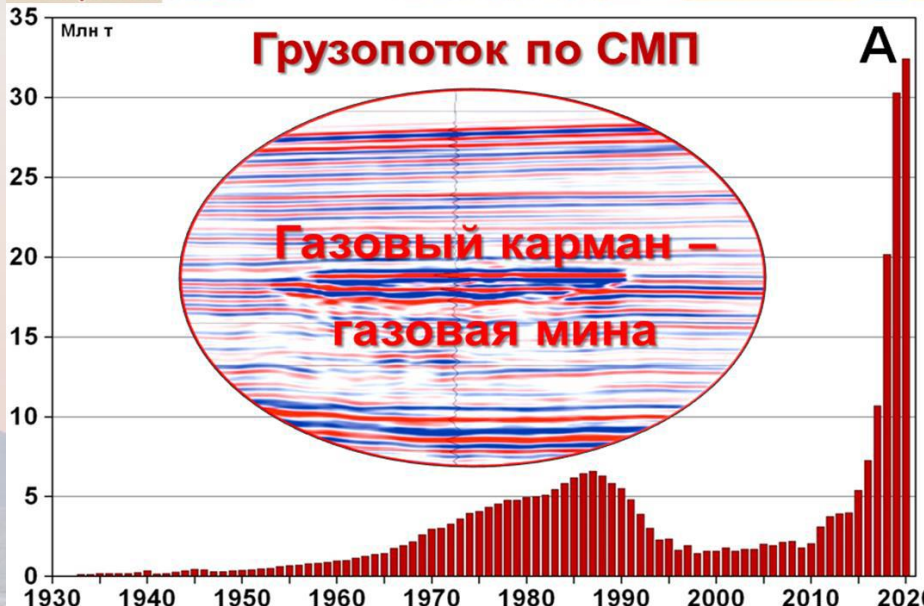
ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.345-553.981

МЕРЗЛОТА, ГАЗОГИДРАТЫ И СИПЫ ГАЗА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2021 г. Член корреспондент РАН В. И. Боговявленский*, А. В. Кишанков†, А. Г. Катанни†

Получено 21.05.2021 г.
После доработки 09.06.2021 г.
Принято к публикации 11.06.2021 г.



Газовые воронки на Ямале



Кратер выброса газа С1 на Ямале
Gas Blowout Crater C1 in Yamal
2014-2016



25.08.14



08.07.15



04.09.15



17.08.16

Russian Center of Arctic Development

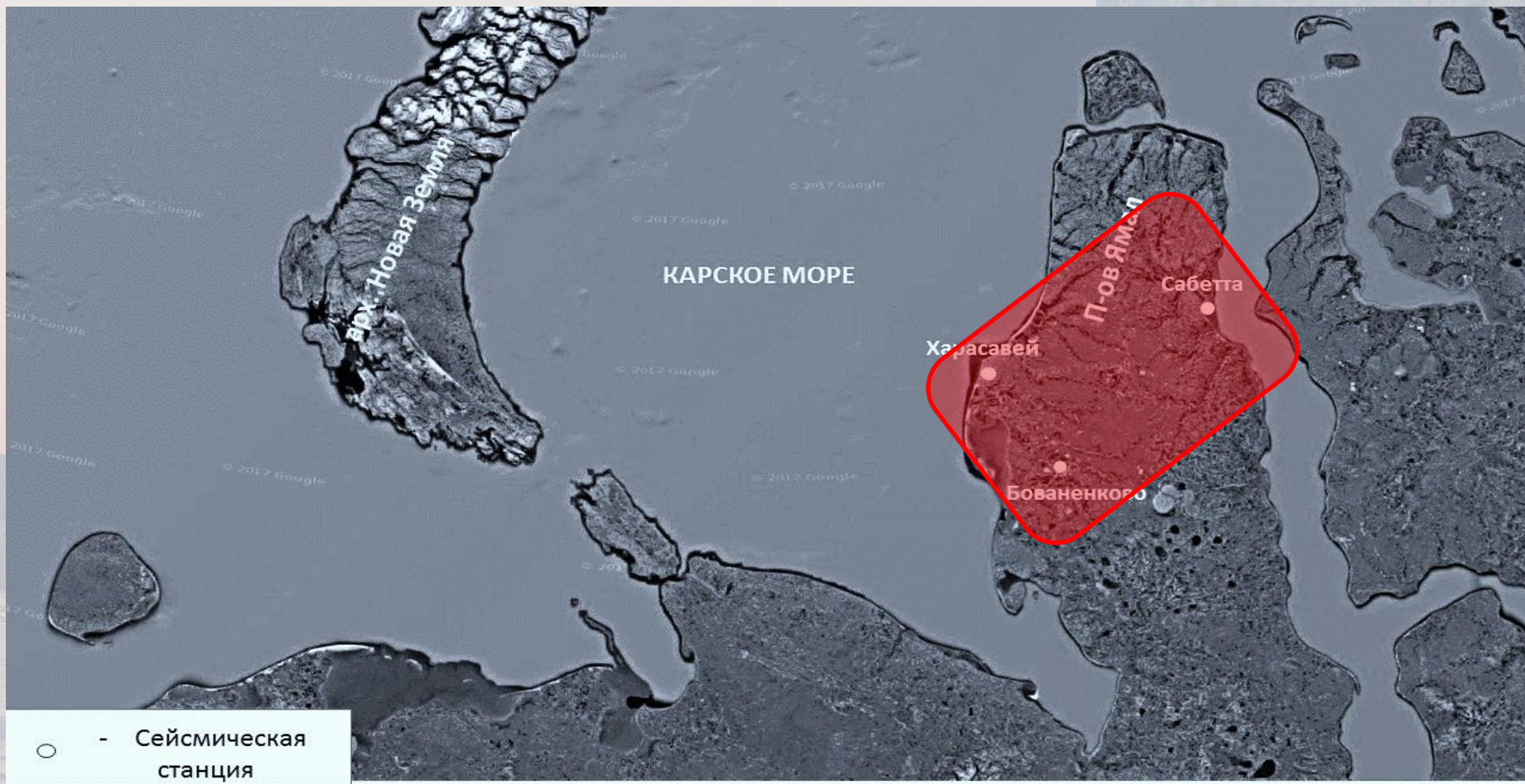
Озера Ямала - не термокарст, а взрывные кратеры «метановых бомб»?



Вид поверхности Бованенковского района с высоты 14 км

Школой академика И.И.Мохова (ИФА РАН) высказано предположение, что значительная часть малых озер округлой формы на Ямале, которые ранее считались термокарстовыми, связаны с процессами газовых выбросов.

Схема расположения станций сети



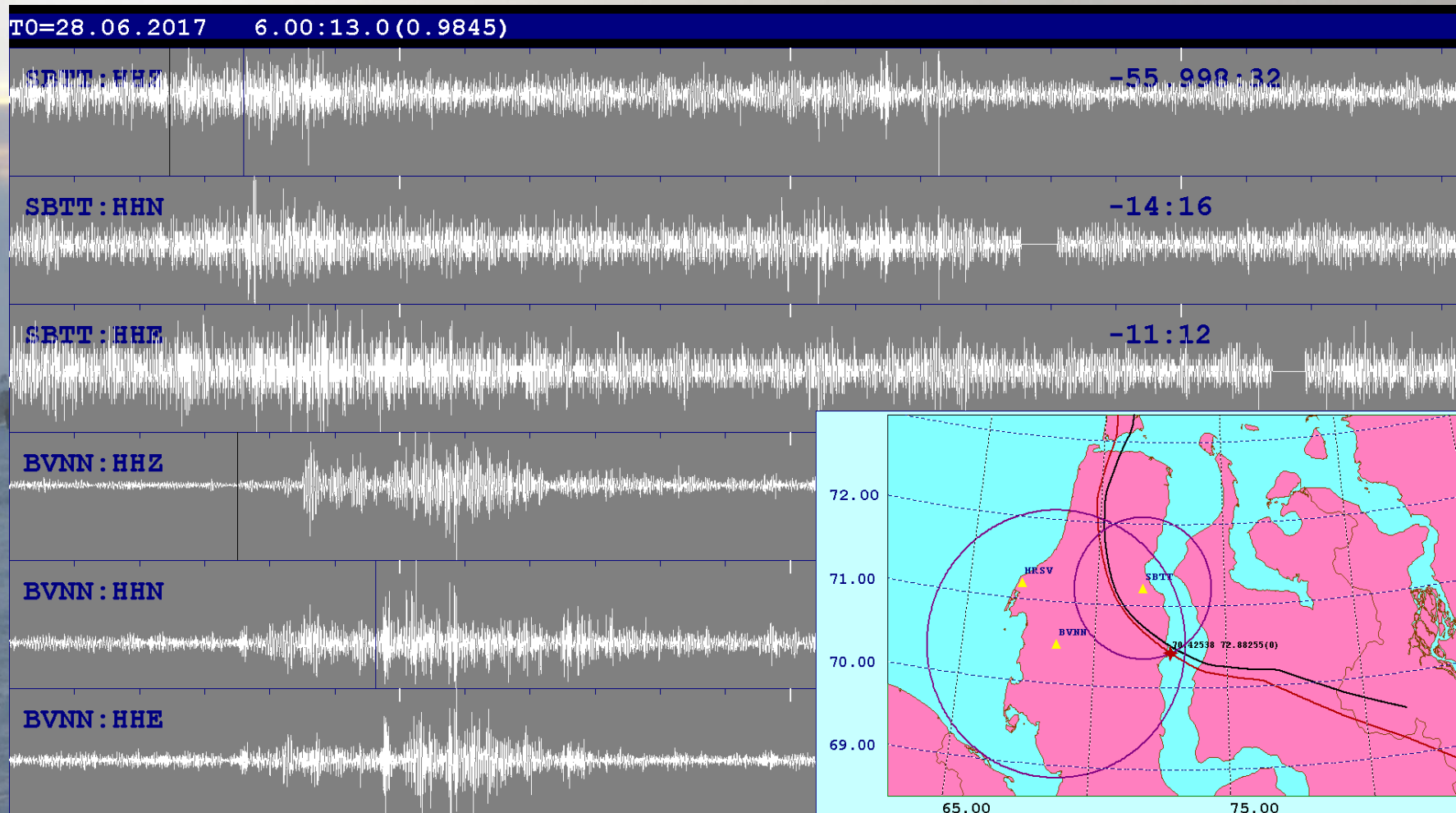
Вид воронки с вертолета

(снимки предоставлены МЭЦ «Арктика»)



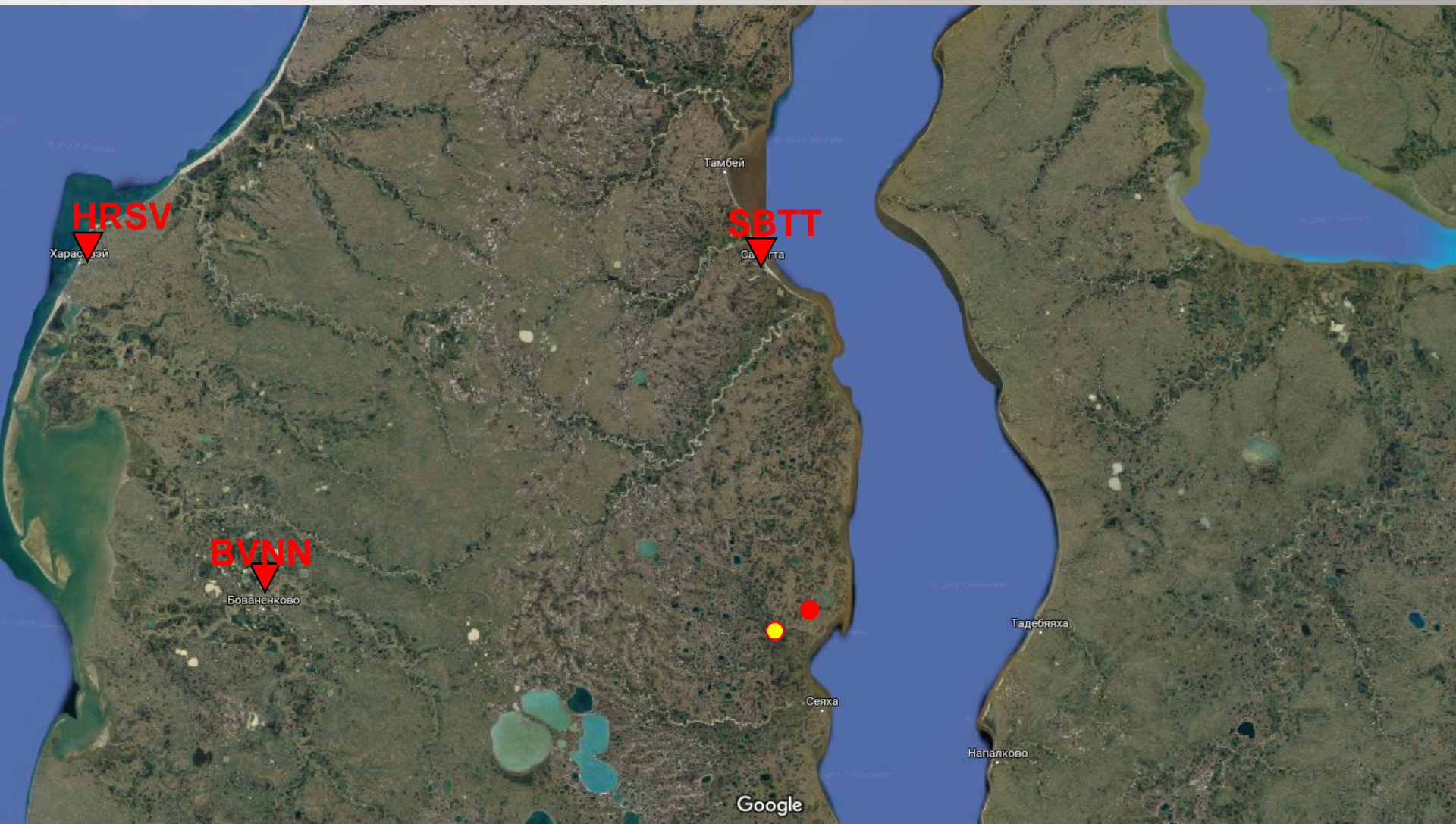
днем 29 июня 2017 года ввысь возле озера Хасуй-то взметнулся столб
черного дыма и языки пламени

Сейсмический сигнал

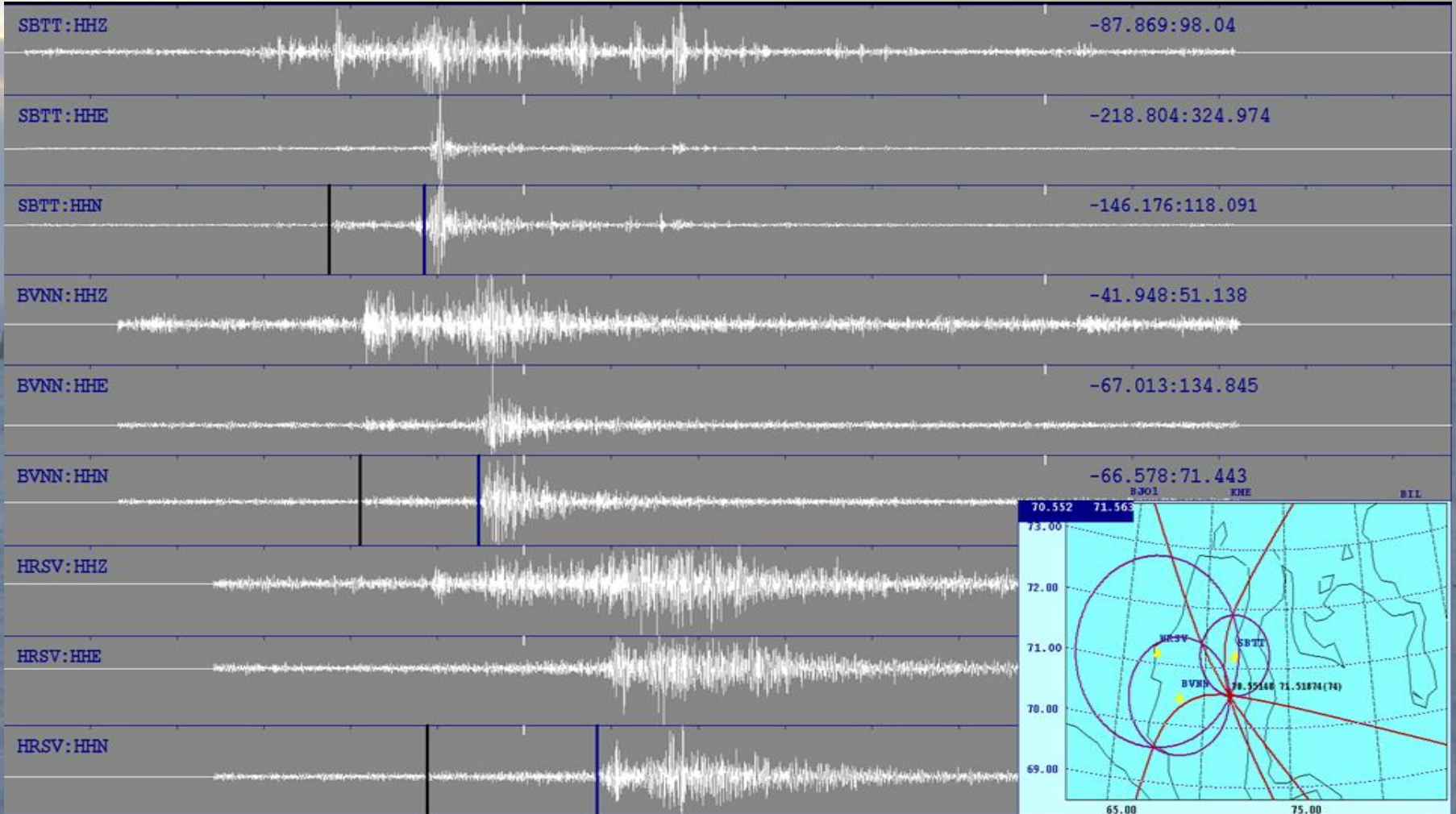


Событие зарегистрировано 2 сейсмическими станциями (Сабетта и Бованенково).
Результат предварительной локации - $70^{\circ}24'$ с.ш. $72^{\circ}21'$ в.д.

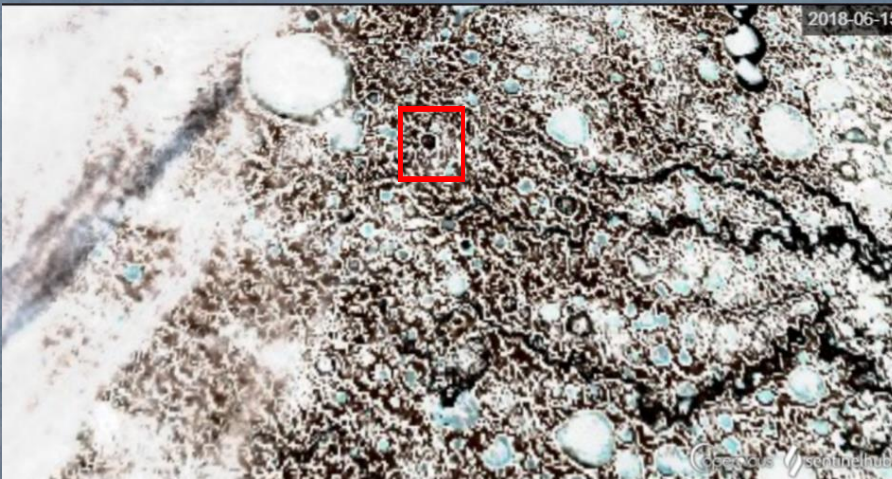
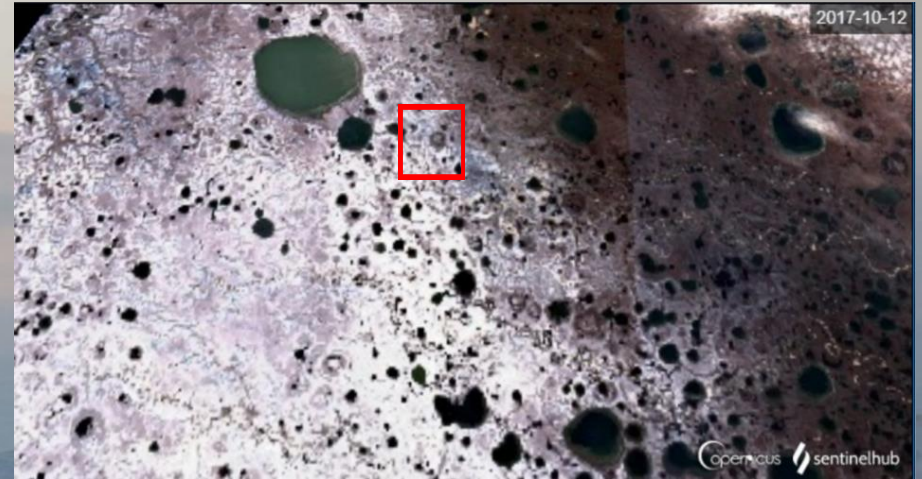
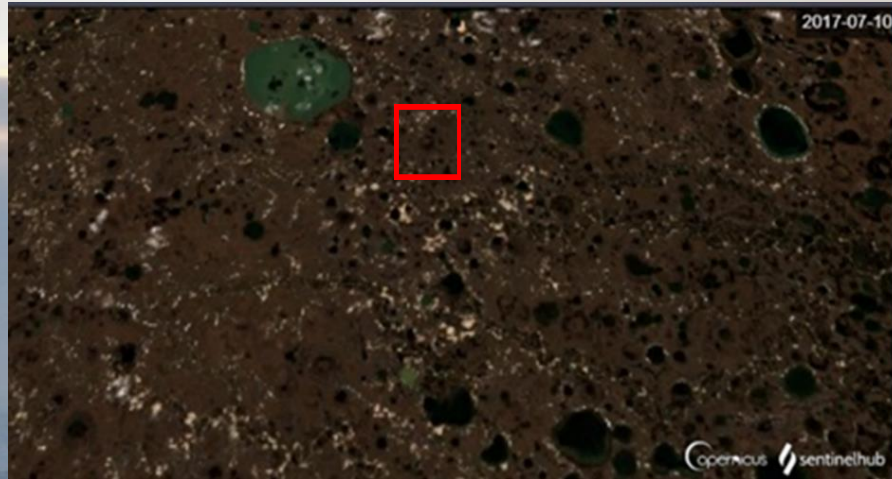
Результат локации по 2 станциям



Пример сейсмического события, записанного 3 станциями на п-ве Ямал 19 марта 2018 года, вызванный выбросом газогидратов



Вид воронки по спутниковым снимкам КА Sentinel-2 (2017-2021 г.г.)



Дата образования воронки 18 марта 2018 года

Проблематика сейсмического мониторинга опасных процессов в арктической зоне РФ



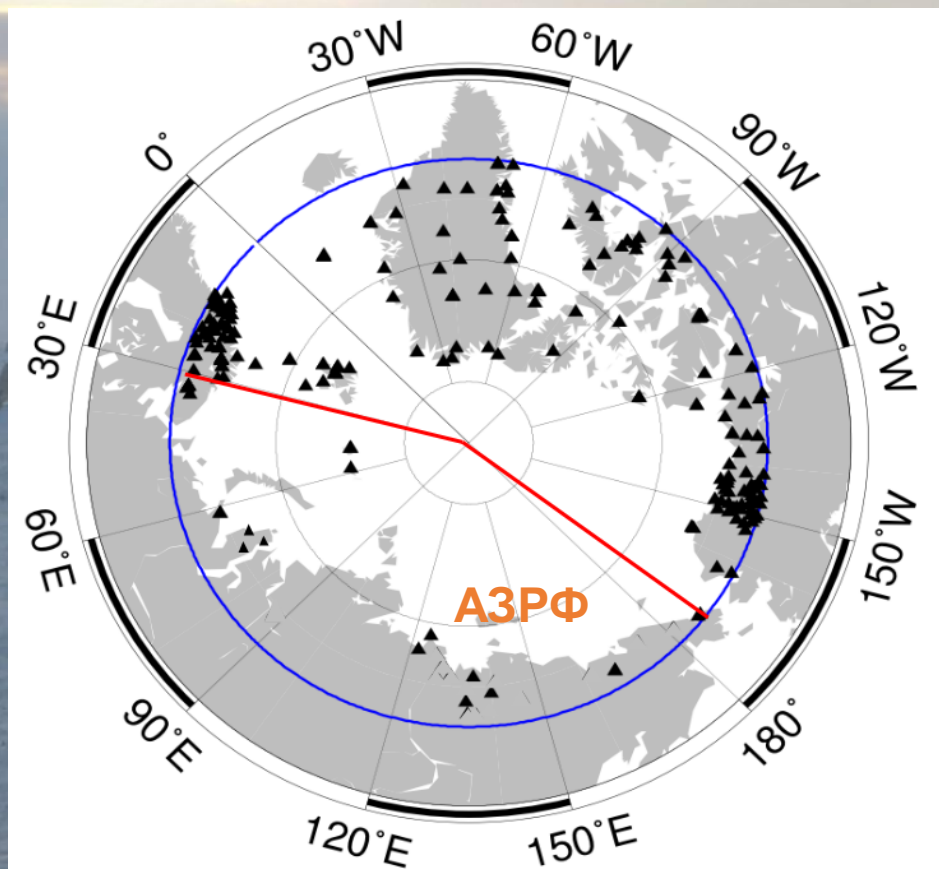
Моделирование геомеханической эволюции нефтегазовых природных-технических систем Баренцевоморской и Карской провинциях находятся на самой начальной стадии.

До начала проектно-изыскательских работ на промышленных месторождениях нефти и газа Баренцевоморской и Карской провинциях риски, связанные геолого-геодинамическими и физическими факторами, практически не исследовались. Базы знаний и данных по многим аспектам данной проблемы остаются все еще неадекватными масштабу и сложности намечаемых программ формирования морских нефтегазовых промыслов на арктическом шельфе

В настоящее время совершенно **неизученным и неоцененным** остается **риск-фактор, связанный с современным «грязевым» (газоводолитокластитовым) вулканизмом на Баренцевоморском шельфе.** Только в последние годы появились сейсмогеологические данные о наличии слоев и линз газогидратов в верхних горизонтах осадочного чехла в западном борту шельфа, а также признаки «газовых факелов» под тонким покровом газонепроницаемых глинистых отложений в Новоземельском и Карском участках шельфа. На Ямале и Таймыре в последние 1- лет выявлено **более 30 взрывных воронок**, часть из которых образовалась вблизи действующих нефтегазопромыслов.

На сегодняшний день существующая федеральная система сейсмологических наблюдений не позволяет надежно фиксировать такие события в Арктике в связи с ограниченным числом сейсмических станций

Сейсмические станции в арктике

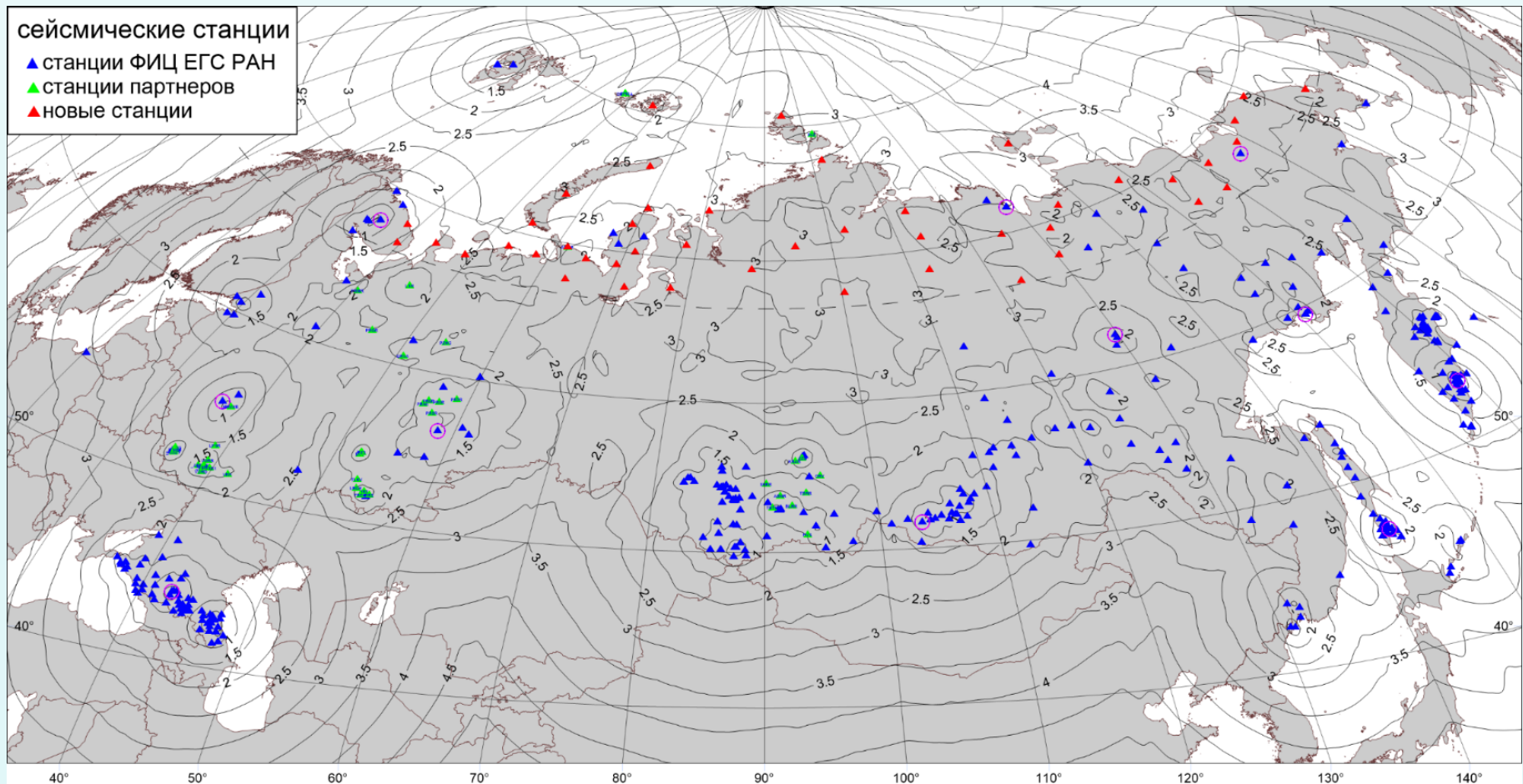


Создание и развитие Федеральной системы геофизического мониторинга в Арктике крайне необходимо.

Система позволит существенно повысить уровень обеспечения безопасности населения РФ в части своевременного оповещения о чрезвычайных ситуациях и их последствиях природного и техногенного характера, а также разработать новые механизмы их прогнозирования.

В свете активного освоения Арктики и развития Северного морского пути в ближайшие годы эта проблема приобретает высокий приоритет

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗВИТИЮ СЕТИ В АРКТИКЕ



Поручение Президента РФ от 6 марта 2023 г. Пр-464, п. 13)

з) обеспечить разработку и реализацию комплекса мер, направленных на исследование опасных природных явлений, проведение постоянного сейсмического мониторинга на сейсмоопасных территориях, на критически важных объектах и объектах повышенной опасности, расположенных в сейсмоактивных районах, предусмотрев привлечение к реализации комплекса мер государственных корпораций и иных организаций, в том числе занимающихся поиском и добычей полезных ископаемых и промышленным рыболовством, а также обеспечить осуществление проектов в области снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на полуострове Камчатка и острове Сахалин.

Доклад – до 1 августа 2023 г., далее – один раз в год.

Белый мишка





РНФ
Российский
научный фонд



Спасибо за внимание!

