



чл.-корр. РАН И.П. Семилетов

(академик РАН, д.ф.-м.н. Л.И. Лобковский, д.г.м.н. О.В. Дударев, д.г.м.н. А.В. Кошурников, к.ф.-м.н. А.А. Крылов, к.б.н. Е.М. Латковская, к.г.н. И.И. Пипко, д.т.н. В.М. Пищальник, к.г.н. С.П. Пугач, проф. Е.А. Романкевич, д.г.-м.н. В.Е. Тумской, д.г.м.н. Н.Е. Шахова, к.т.н. Д.В. Черных, и более **130 ученых** из ЛАИ ТОИ ДВО РАН, ИОРАН, МГУ, СахГУ, ТГУ, ТПУ, ФИЦ Биотехнологии, ИМЗ СО РАН, Сколтех, МФТИ,)

Климатический и экологический мониторинг арктических и субарктических морей России (1994-2024 гг.): проблемы и избранные результаты.

ИГКЭ

5 июня, 2024

Москва

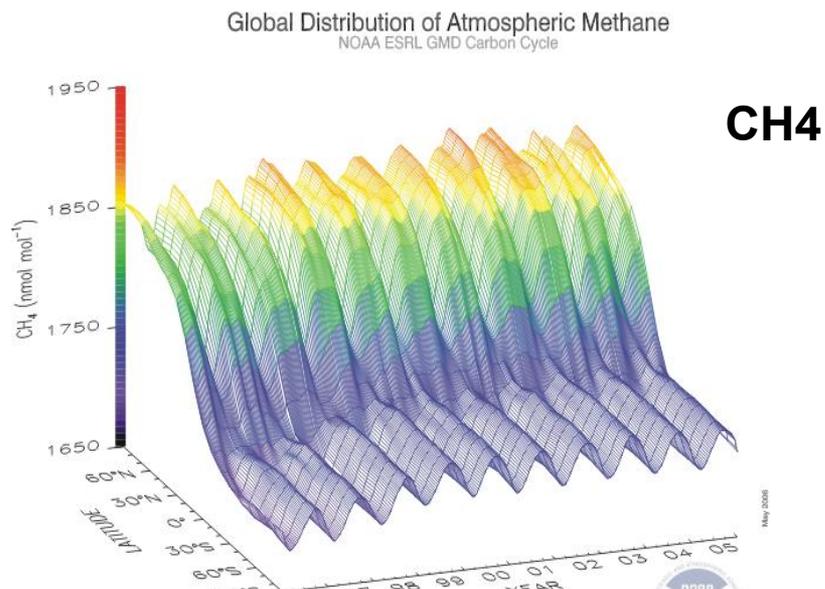
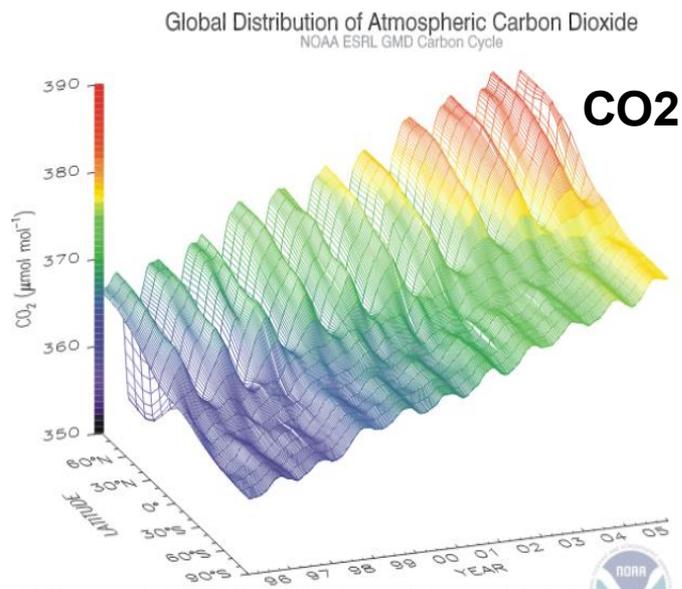
В настоящее время развитие мировой климатологии испытывает трудности, обусловленные, в первую очередь, недостатком знаний о степени влияния антропогенных и естественных факторов на изменение климата, что приводит к большому количеству неопределенностей в функционировании климатической системы нашей планеты и вызывает ряд серьезных проблем, связанных с планированием развития в области энергетики, что определяет социально–экономическое развитие всех стран.

Вопрос о климатической безопасности становится одним из геополитических приоритетов. В этом контексте, Российская Федерация (РФ) занимает особое положение, так как примерно 2/3 территории РФ находится в зоне деградирующей вечной мерзлоты, которая является хранилищем органического углерода (ОУ) планетарного масштаба

Глобальный вызов: эффективность «легких» планеты: лесов Сибири и Амазонии в последнее время оценивается близкой к «нулевой». Начинается переоценка роли Мирового океана в поглощении атмосферного CO₂.

Наши исследования направлены на количественную оценку роли обширных морских экосистем арктического шельфа РФ и Дальневосточного (ДВ) региона в балансе основных радиационно-активных (парниковых) газов, CO₂ и метана (CH₄)

Роль арктического источника в формировании атмосферных максимумов основных парниковых газов, CO₂ и CH₄, до настоящего времени замалчивается (IPCC, 2007, IPCC, 2014...)



Доказано, что планетарный максимум (ПМ) содержания метана (CH₄) находится над Арктикой: на 10% выше чем над Антарктикой, и на 5-7% выше чем над умеренными широтами северного полушария, где сконцентрированы антропогенные источники. Этот максимум существовал в предыдущие теплые геологические эпохи, и отсутствовал в ледниковые эпохи. Такая же (но менее выраженная, примерно на 2% выше над Арктикой) закономерность наблюдается с планетарным максимумом двуокиси углерода в атмосфере.

ГИПОТЕЗА: формирование атмосферного максимума CH₄ (и двуокиси углерода) обусловлено изменением состояния мерзлоты (деградацией) и массивированной разгрузкой парниковых газов в атмосферу.

Деградация мерзлоты приводит к дисбалансу С-цикла и потокам CH_4 и CO_2 в атмосферу за счет вовлечения в современный биогеохимический цикл гигантского количества древнего ОВ.

Потенциал ОВ наземной мерзлоты



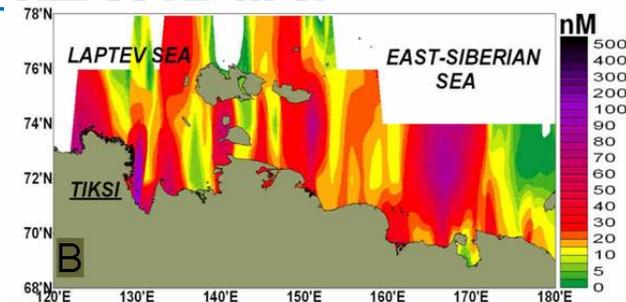
Photo: P. Kuhry (PPP, 2009)

- Почва, слой (0-3m): ~1400 Гт-С

- таяние /эрозия- вовлечение ОВ, эмиссия CO_2 и CH_4
- адвективный перенос реками

Подводная мерзлота (ПМ) Вост-Сиб.шельфа

- ОВ, гидраты-свободный газ: ~1000-1400 Гт-С
- IPCC/ACIA: до наших работ было принято считать, что CH_4 - гидраты стабильны, потому что ПМ- сплошная и стабильная...

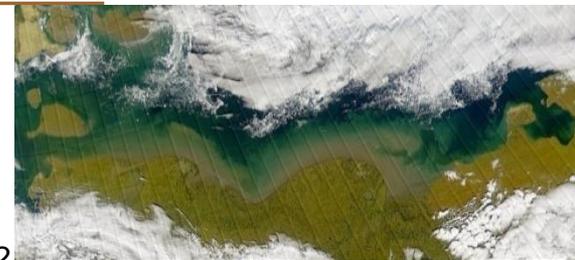


Shakhova, Semiletov et al. (Science, 2010)

Береговой Ледовый Комплекс

(Едома)

- Резервуар ОВ: ~ 400 Гт-С
- термо-абразия и волновая эрозия
- экспорт ОВ в море, и его окисление до CO_2



4000 км береговой

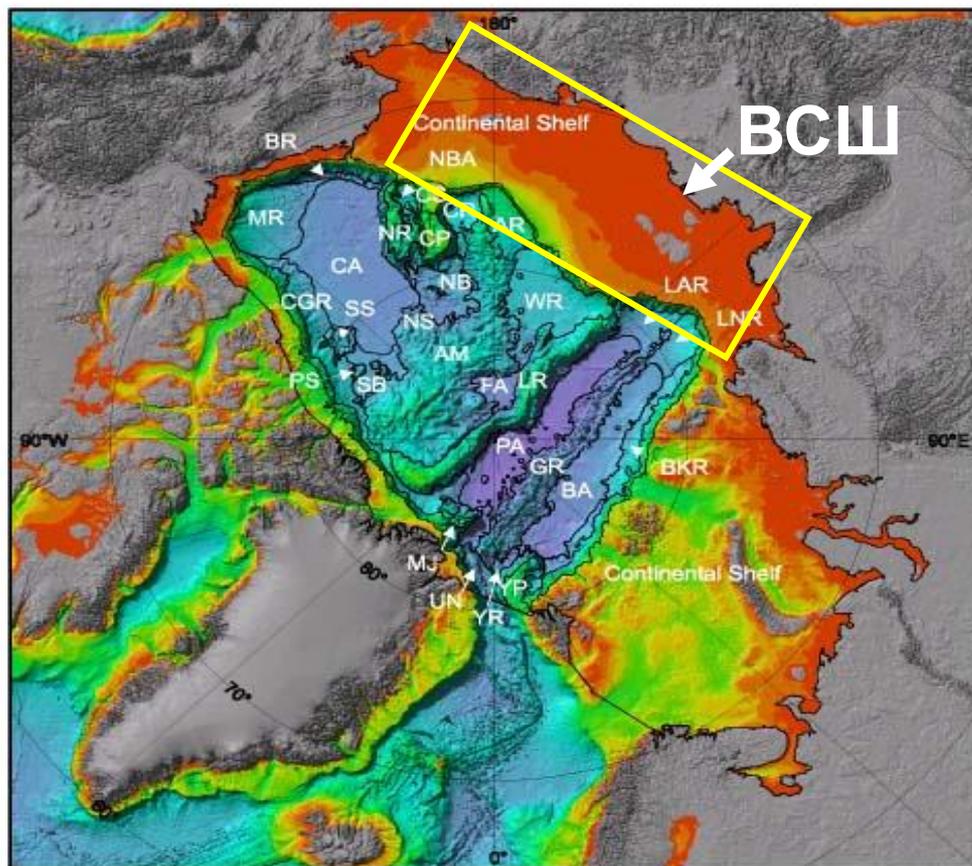


Фото: И. Семилетов

Для сравнения: в атмосфере
750 Гт CO_2 и 5 Гт CH_4

1 Гт = 1 миллиард тонн

Почему Восточно-Сибирский шельф (ВСШ)?



- **ВСШ** –самый мелководный и широкий шельф Мирового океана [МО]

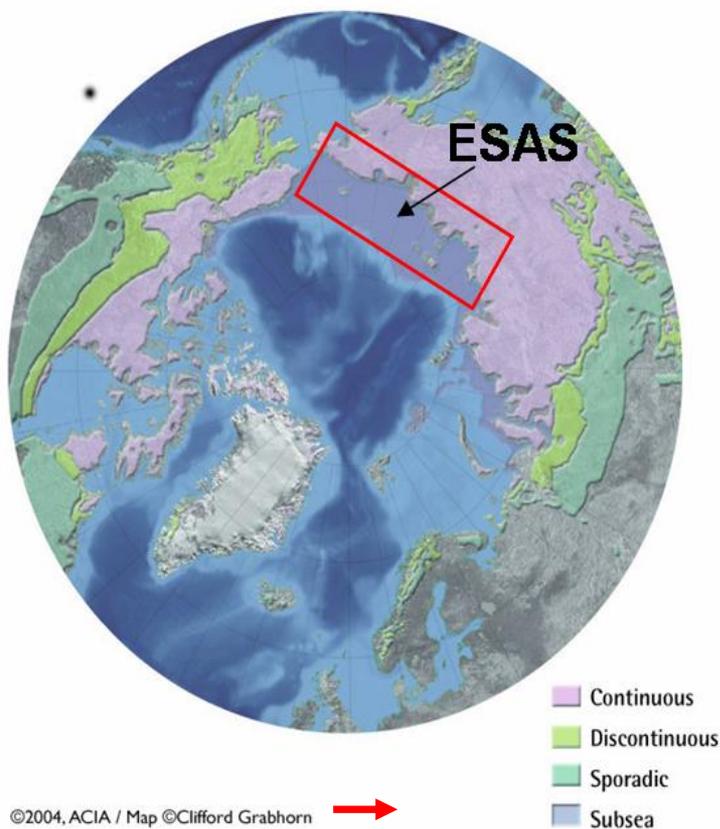
- Общая площадь **$2.1 \times 10^6 \text{ км}^2$** (~25% от всего шельфа Северного Ледовитого океана (СЛО); ~8% шельфа от всего МО;

- ~75% площади мельче 50м (средняя глубина МО ~ **130 м**); осадочная толща мощностью до **20 км**; содержание Сорг до **12%**.

- благодаря колебаниям уровня океана, в холодные геологические эпохи шельф полностью осушался –формировалась мощная мерзлотная толща (до 800м – по Н.Н. Романовскому)

Направление 1 :

Состояние подводной мерзлоты определяет стабильность гидратов. **Деградация подводной мерзлоты** приводит к дестабилизации гидратов – потенциальный климатический фактор, и георискам при развитии инфраструктуры СМП

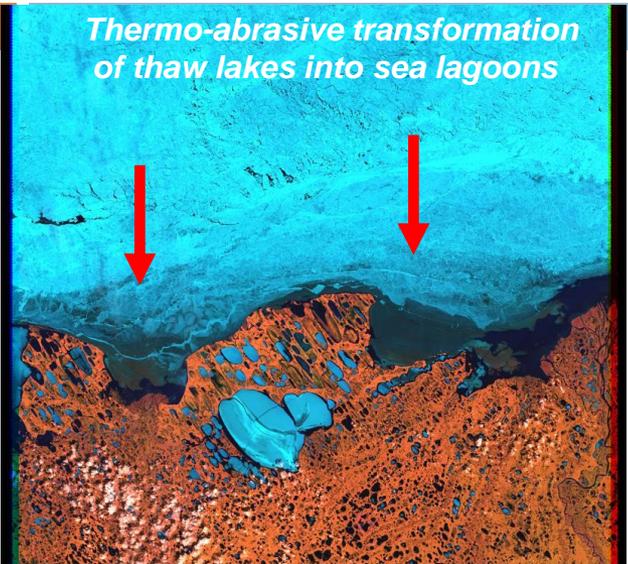


А) **80%** от общей площади подводной мерзлоты Северного Ледовитого океана находится в ВСШ

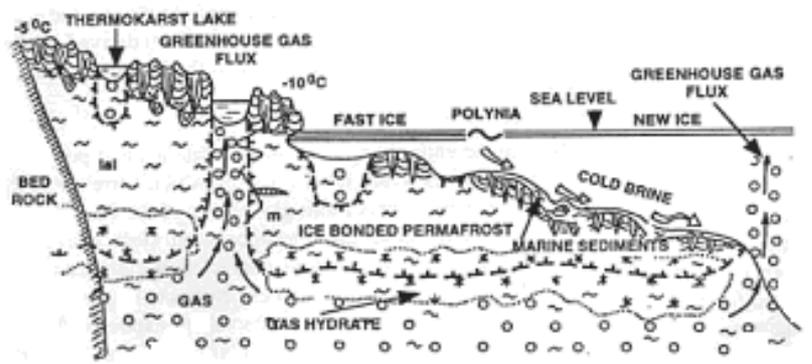
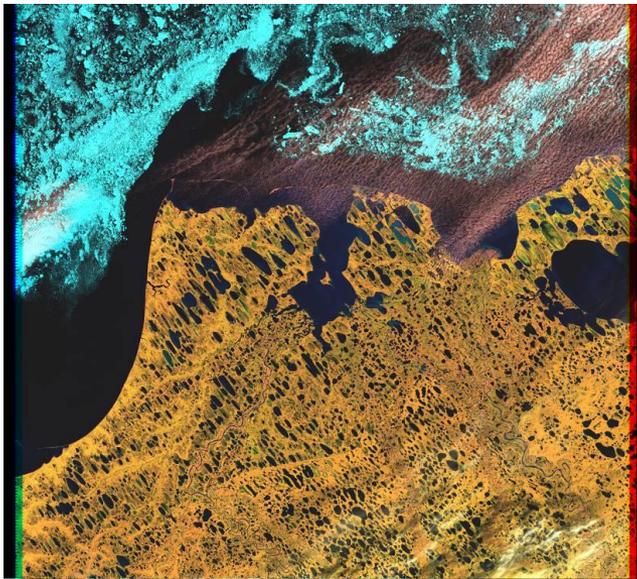
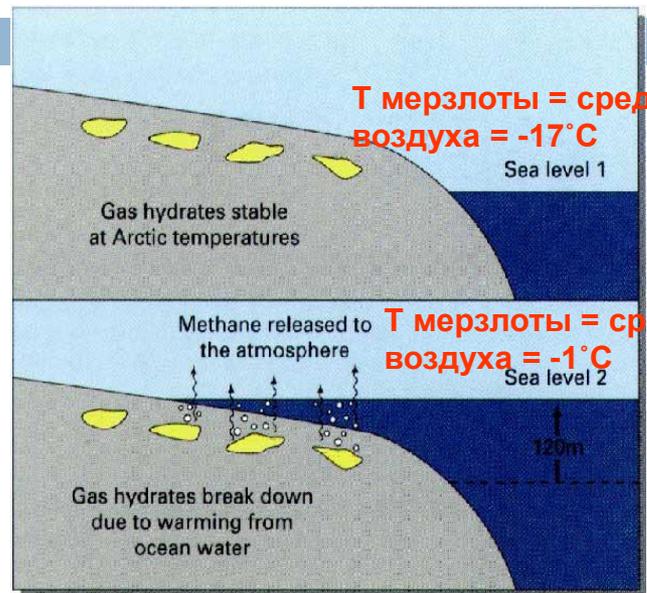


Б) Мелкозалегающие арктические гидраты (на глубинах > 100м) распространены под более **80%** мерзлоты (*интерпоровые гидраты могут быть обнаружены на любой глубине*)

Развитие термокарста и солевой диффузии в субаквальных условиях (шельф, реки, озера)- основной процесс дестабилизации гидратов в Арктике и Субарктике



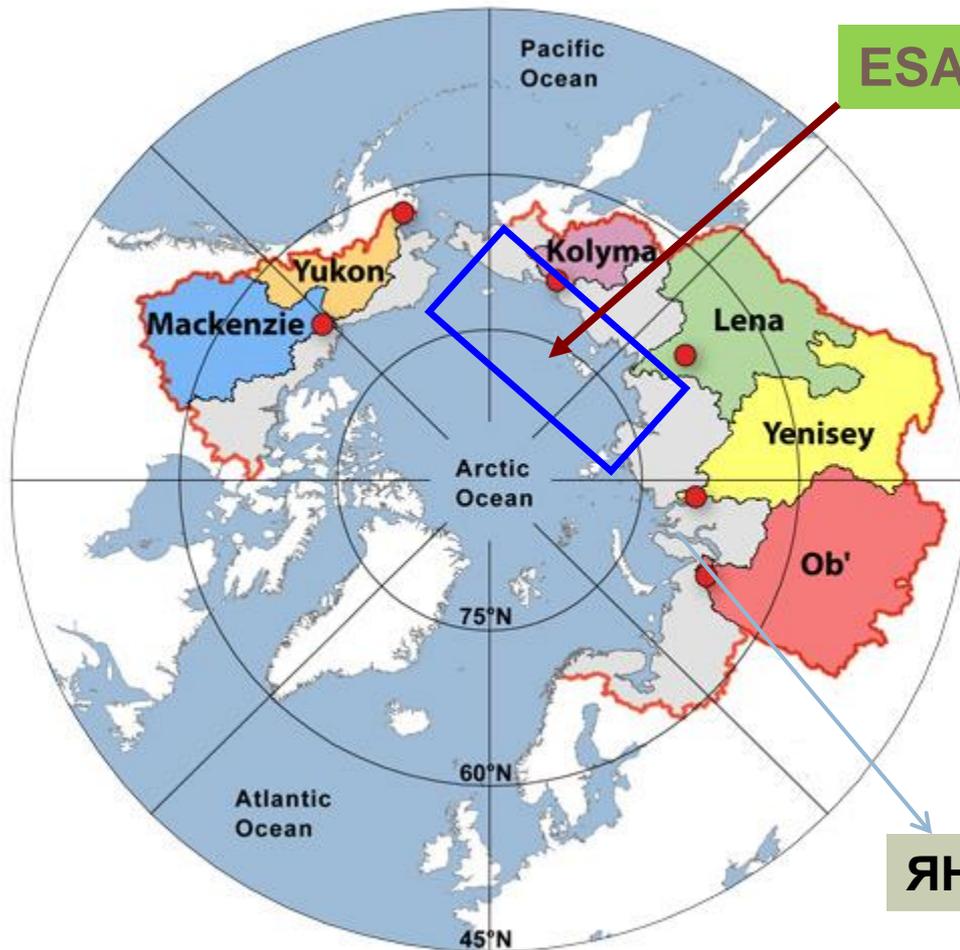
Thermo-abrasive transformation of thaw lakes into sea lagoons



Сквозные талики – пути разгрузки пузырькового метана, основного продукта разрушения гидратов

Направление 2

Основа понимания экологических изменений на акватории СМП = исследование функционирования арктической системы суша-шельф



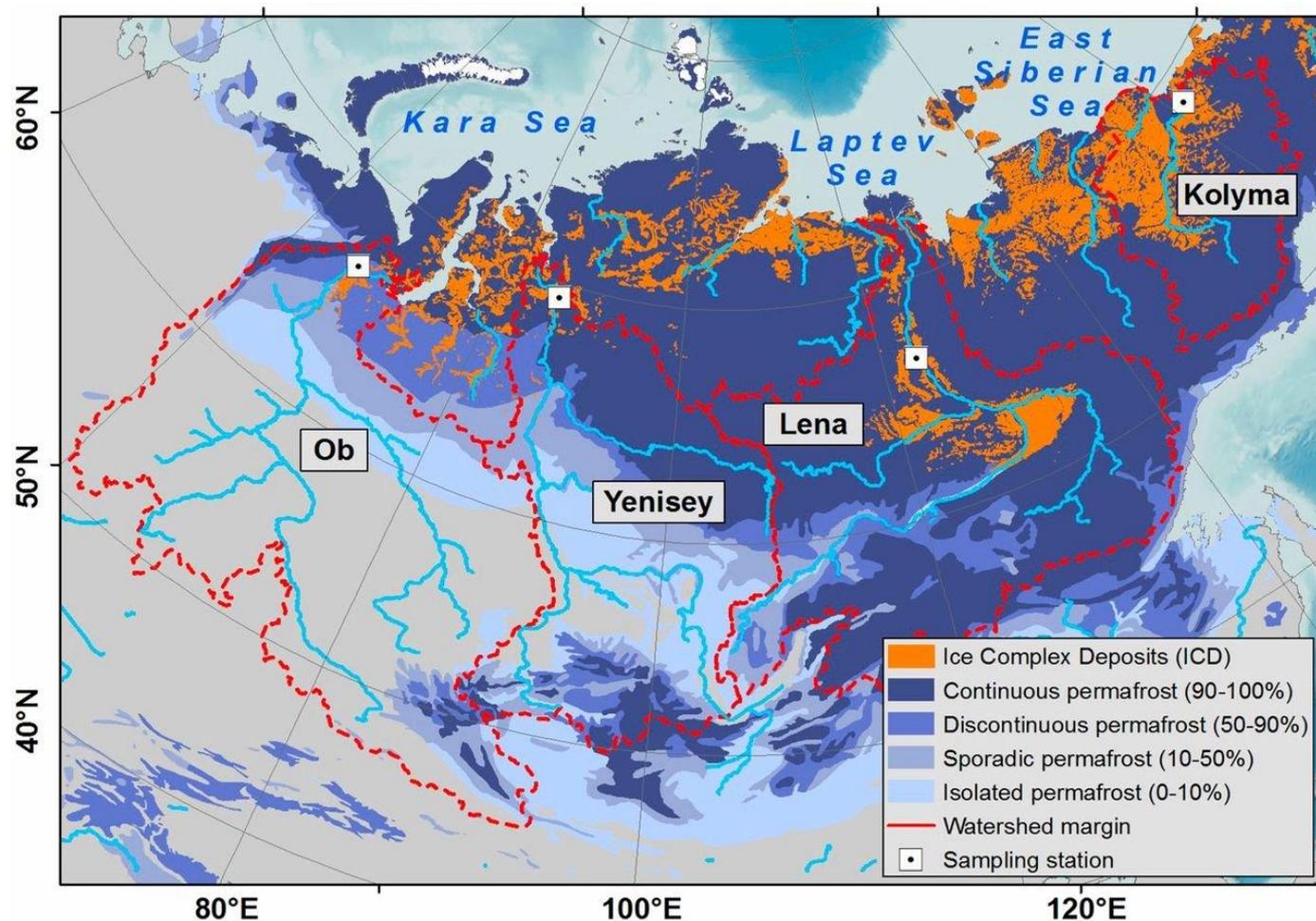
ESAS

- 6 рек – Хатанга, Оленек, Лена, Яна, Индигирка, Колыма приносят ежегодно в МВА примерно – 7×10^{11} м³, что примерно в 2 раза меньше стока (О+Е)
- Водосбор реки Обь превышает акваторию Карского моря, а реки Лены соизмерим с акваторией МВА (2.5×10^6 km²)

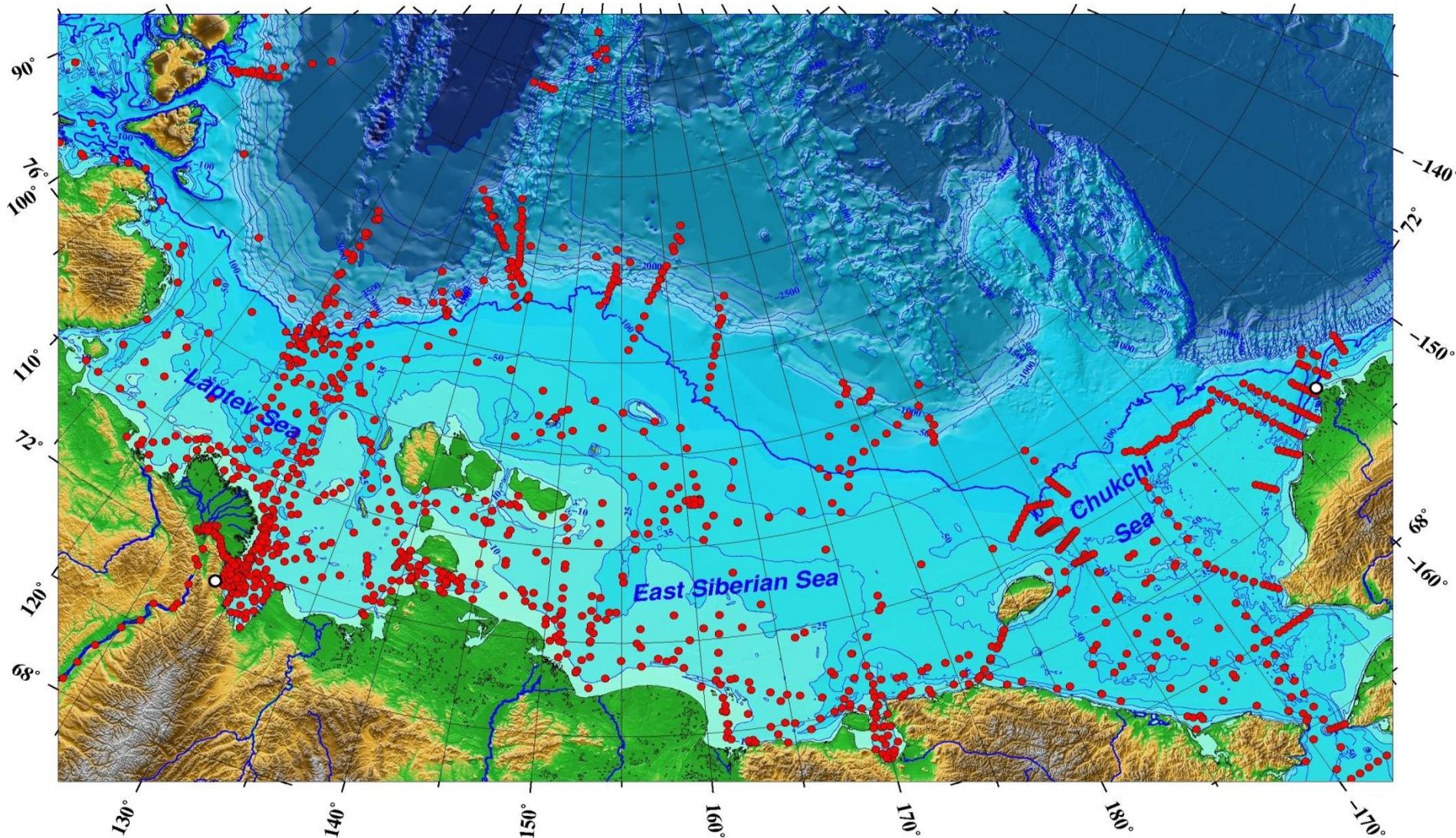
ЯНАО

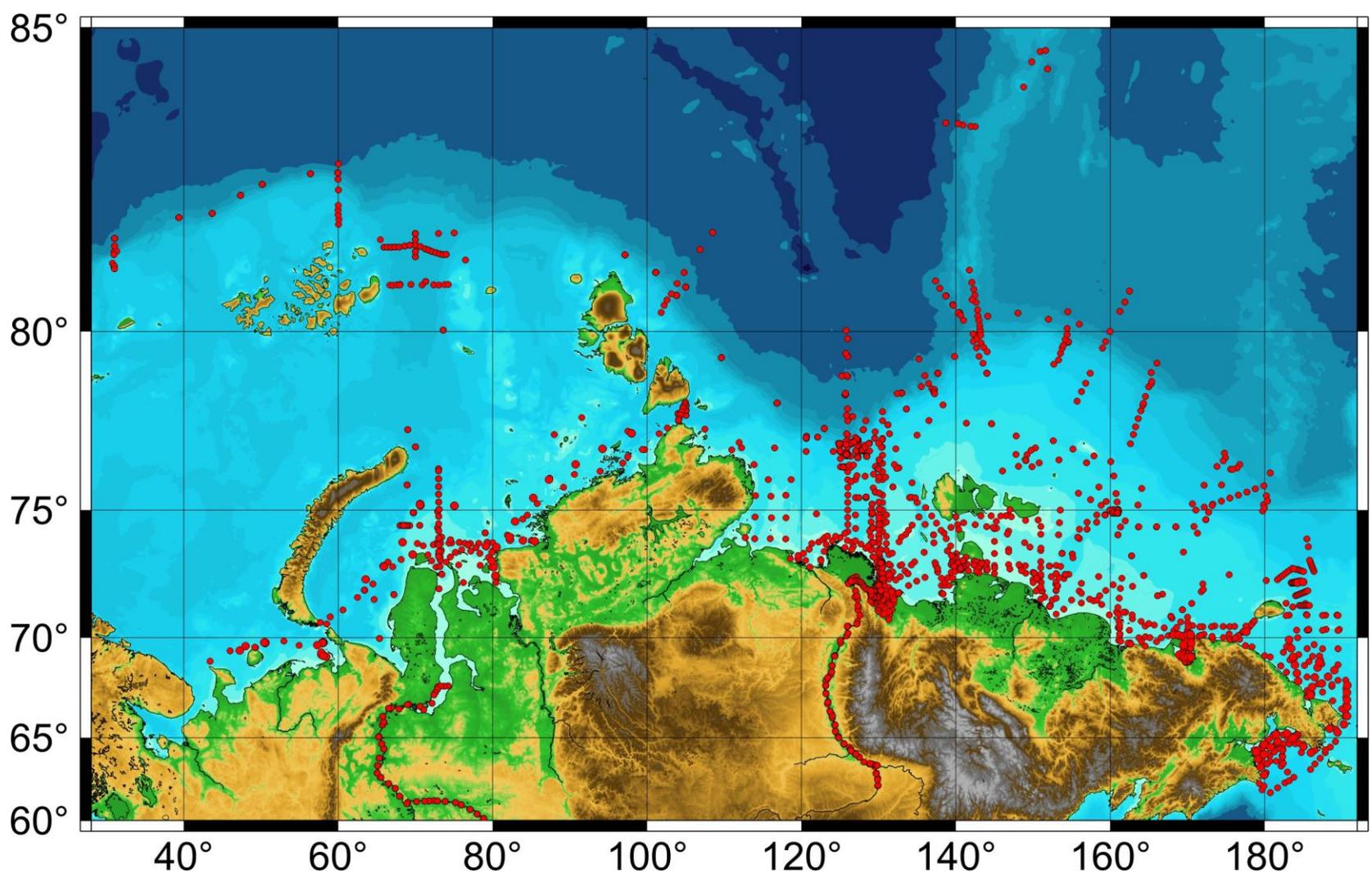
Экологическое состояние и климатическая роль акватории Северного морского пути (СМП) определяется экспортом пресной воды и углерода в арктической системе суша – шельф.

Экспорт углерода определяется состоянием мерзлоты и гидрологическим режимом. Наиболее хрупким компонентом мерзлоты является **ледовый комплекс** (обозначен коричневым цветом)



Результаты основаны на изучении многолетних (1990е-наше время) системных экологических, геофизических, и геологических изменений обусловленных деградацией мерзлоты на арктическом шельфе и в прибрежной зоне





Карта -схема положения комплексных станций выполненных в 50 авторских экспедициях в период 1999-2022гг, включая экспедиции в Великие Сибирские реки Лену и Обь

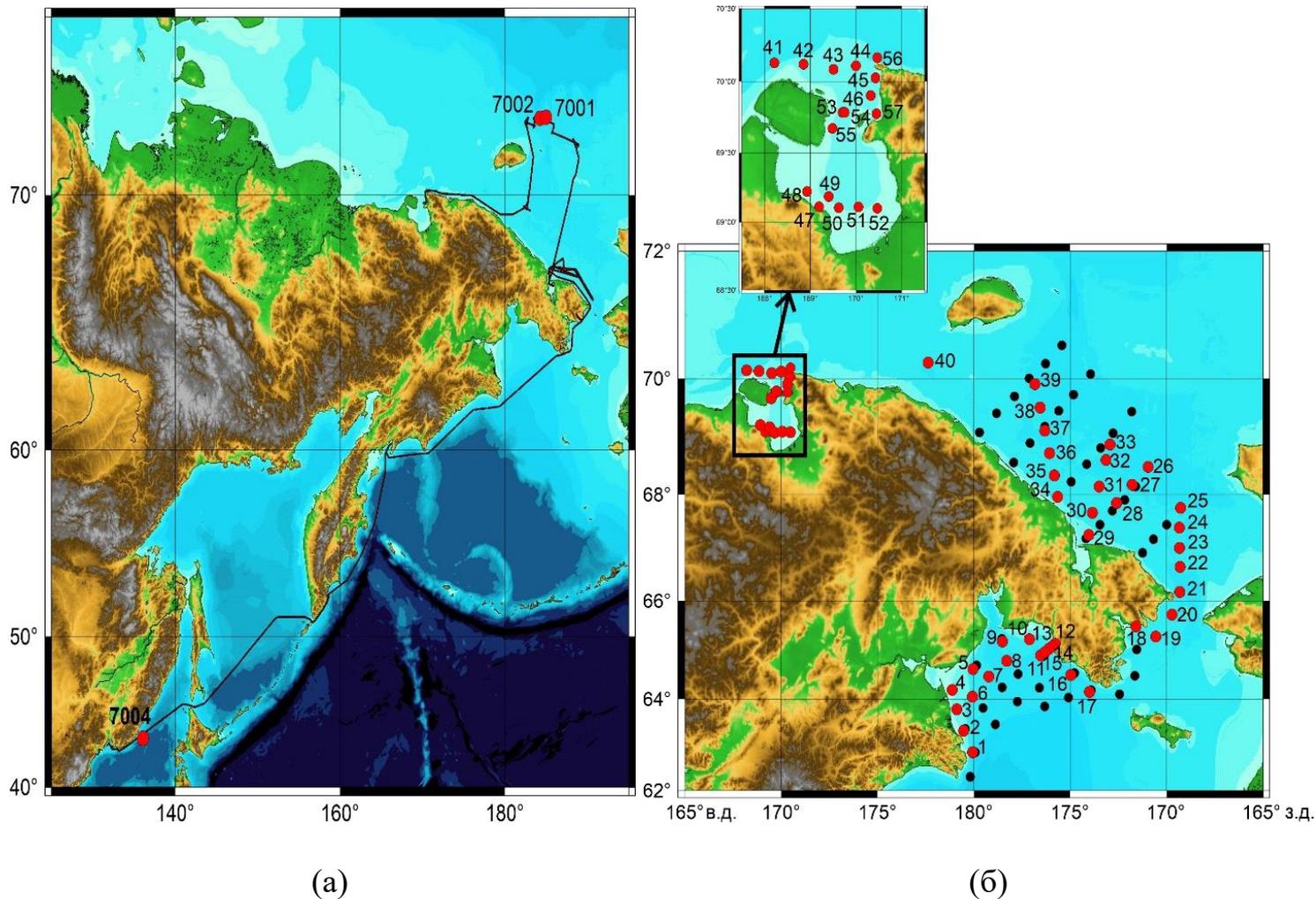


Рисунок 1.1 – Районы работ экспедиций НИС «Академик Опарин» в сентябре – декабре 2023 г. (а – треки маршрутных газогеохимических исследований в системе «поверхностный горизонт водной толщи – приводная атмосфера»; б – районы работ: точки красного цвета – комплексные станции, точки черного цвета – плановые станции, исследования на которых не проведены по причине штормовой погоды.

Научные платформы для летне-осенних исследований: от катеров до НИС океанического плавания и ледоколов (1999-2023гг)



... вертолеты, санно-тракторные поезда, буровые установки и вездеходы в зимний период

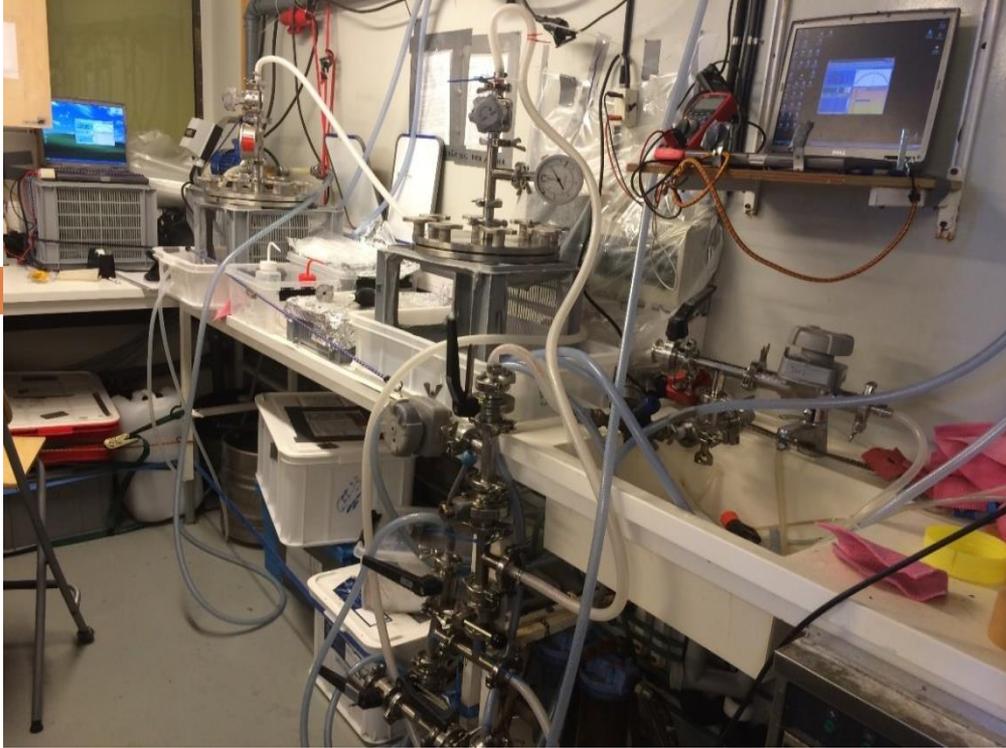


Фрагменты экспедиционных работ



Фрагменты экспедиционных работ

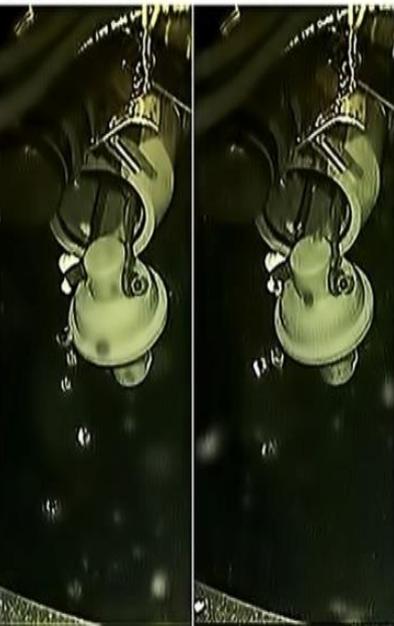
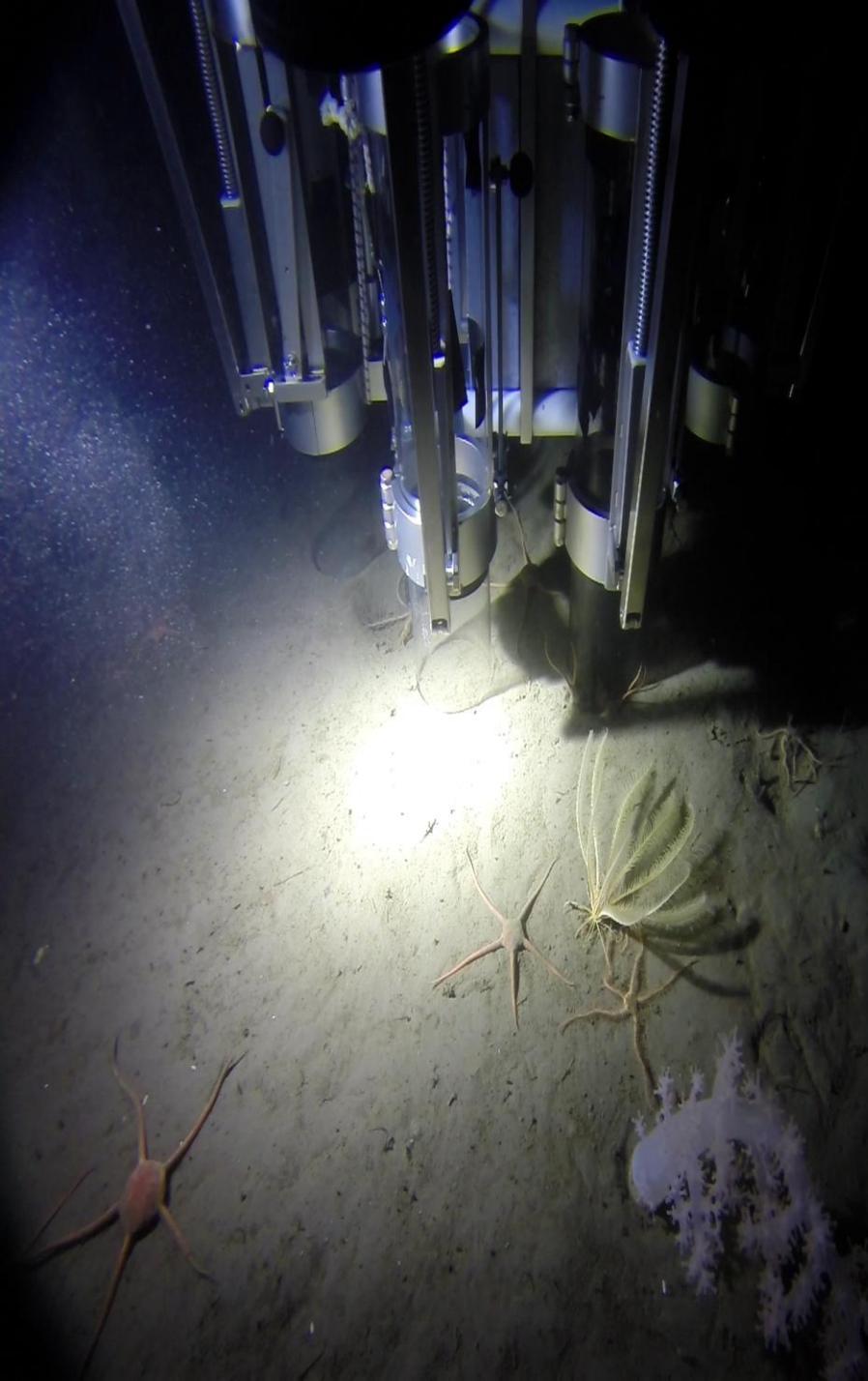
Фильтрационная система для получения достаточно больших образцов взвешенного вещества (ВВ) для проведения комплекса необходимых геохимических (биомаркеры, минералогия, химический состав) и изотопных анализов включая радиоуглеродный возраст органического вещества ВВ.



Использование экстракционной системы для извлечения метана из герметичных сосудов с пробами воды (пивные кеги) с последующей адсорбцией в холодной ловушке и измерения полного изотопного состава метана (C13, D, C14)



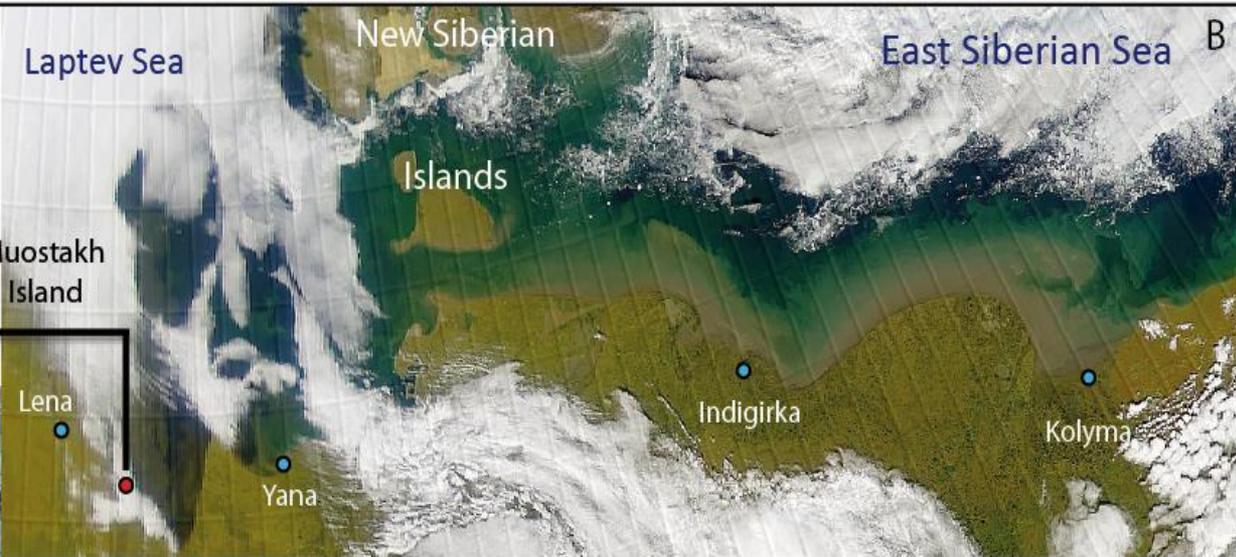
Фрагменты ЭКСПЕДИЦИОННЫХ работ



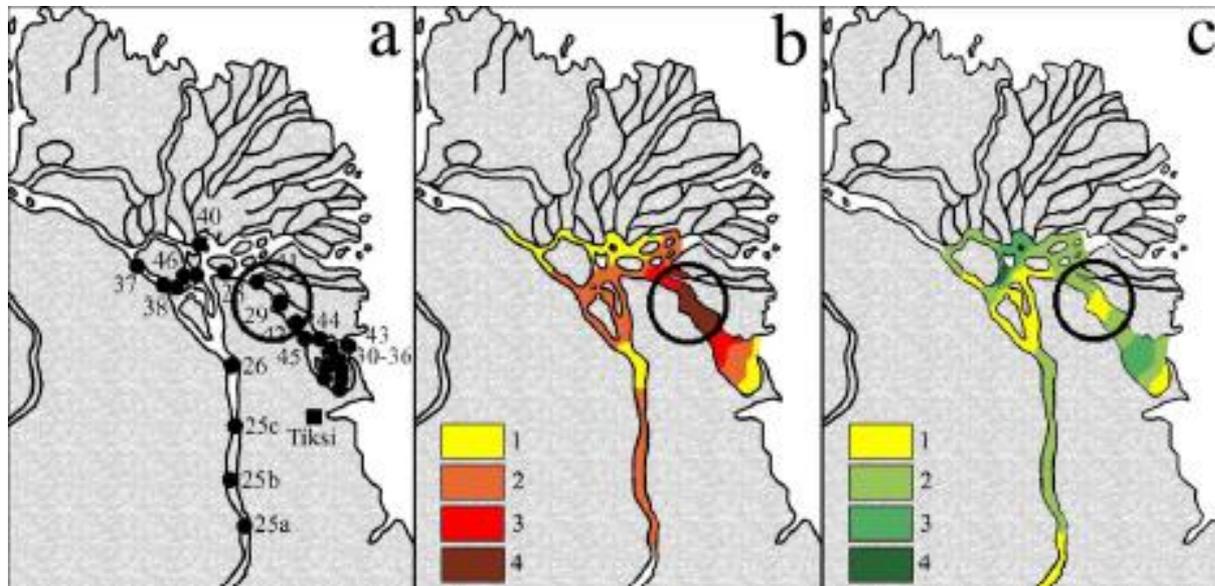
Биогеохимические и климатические последствия деградации наземной мерзлоты:

транспорт и трансформация наземного
органического вещества в арктической системе
суша-шельф

В Сибирских Арктических морях наблюдаются самые высокие скорости береговой эрозии (до 20-30 м за лето)



Годовой вклад рек (на примере р. Лены) в экспорт взвеш. наземного углерода составляет примерно 0.02-0.03 Тг, что на 2-3 порядка ниже вклада эрозионного углерода



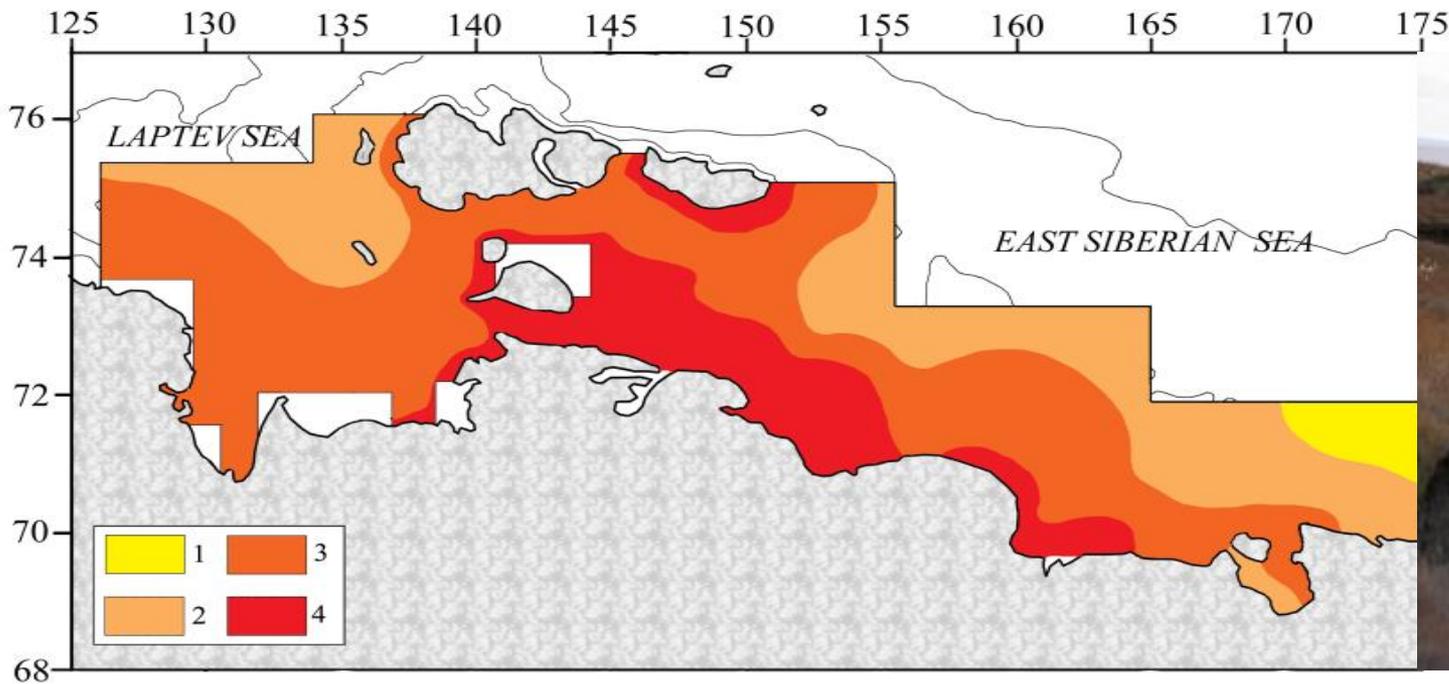
Изменчивость содержания взвешенного органического углерода и его изотопного состава в поверхностном горизонте вод нижнего течения и дельты р. Лена (конец июля – начало августа 2003 г.) (Дударев...Семилетов, ДАН, 2012; Семилетов и др., Цикл..., 2017; Semiletov et al., *Biogeosciences*, 2011):

(a) станции пробоотбора,

(b) РОС, мг/л: :1 – <1, 2 – 1–1,3; 3 – 1,4–1,6; 4 – >1,6;

(c) $\delta^{13}C$, ‰: 1 – $-26 \div -25$; 2 – $-27 \div -26$; 3 – $-28 \div -27$; 4 – легче -28 ‰

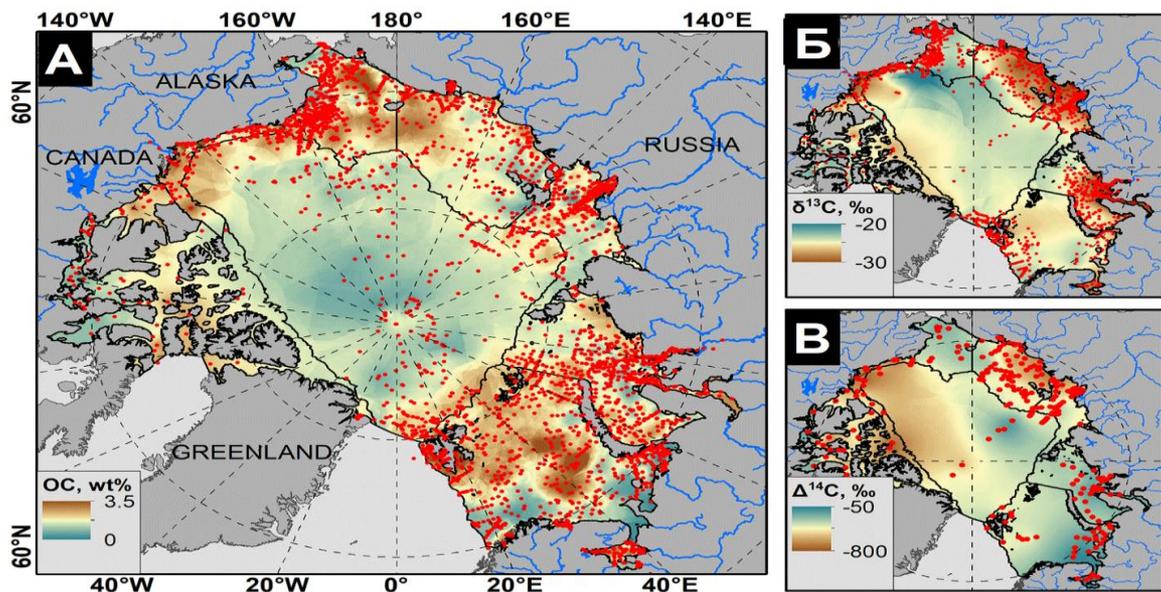
Береговая эрозия является основным источником наземного ОР определяющего современное осадкообразование и биогеохимический режим (экологию) арктического шельфа (МВА)



Вклад наземного эрозийного ОР (ОМ contribution of terrestrial organic carbon (ТОМ, %)) в поверхностных осадках МВА: 1) <40%, 2) 40-69%, 3) 69-98%, 4) 98-100%

(Дударев и др., 2003, 2016; Semiletov et al., *Biogeosciences*, 2011; Semiletov et al., *Environm. Res. Letters*, 2012)

Создание и модификация интегральной базы данных, в которой будут объединены гидрологические, биогеохимические, геофизические и геологические данные по пограничным зонам Российских Арктических морей



Начато создание нового блока данных основанных на результатах исследований молекулярного состава **ОВ** на основе пиролиза **Rock Eval**. В качестве примера реализации такого подхода в рамках данного проекта можно рассматривать статью (Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 130-146).

К российско-шведской базе данных, созданной в 2021 году и названной “CASCADE – The Circum-Arctic Sediment CARbon DatabasE”, присоединились ведущие группы ученых из Канады, США, Швейцарии, Нидерландов и других стран, что позволило собрать данные по концентрации **ОВ** в поверхностных осадках на 4244 океанологических станциях, включая 2317 измерений концентраций азота, 1555 значений изотопного состава органического углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и 268 значений радиоиотопа углерода ($\Delta^{14}\text{C}$), а также 653 пробы исследованы на содержание теригенных биомаркеров. В первичную базу данных также вошли 326 осадочных колонок

Избранные результаты

На основе первой базы данных молекулярного и изотопного состава ОВ донных осадков всего арктического шельфа показано, что биогеохимический и экологический режим акватории СМП определяется экспортом наземного ОВ (Martens, J., Wild, B., Semiletov, I., Dudarev, O., and Ö. Gustafsson. Circum-Arctic release of terrestrial carbon varies between regions and sources. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, no.5858)

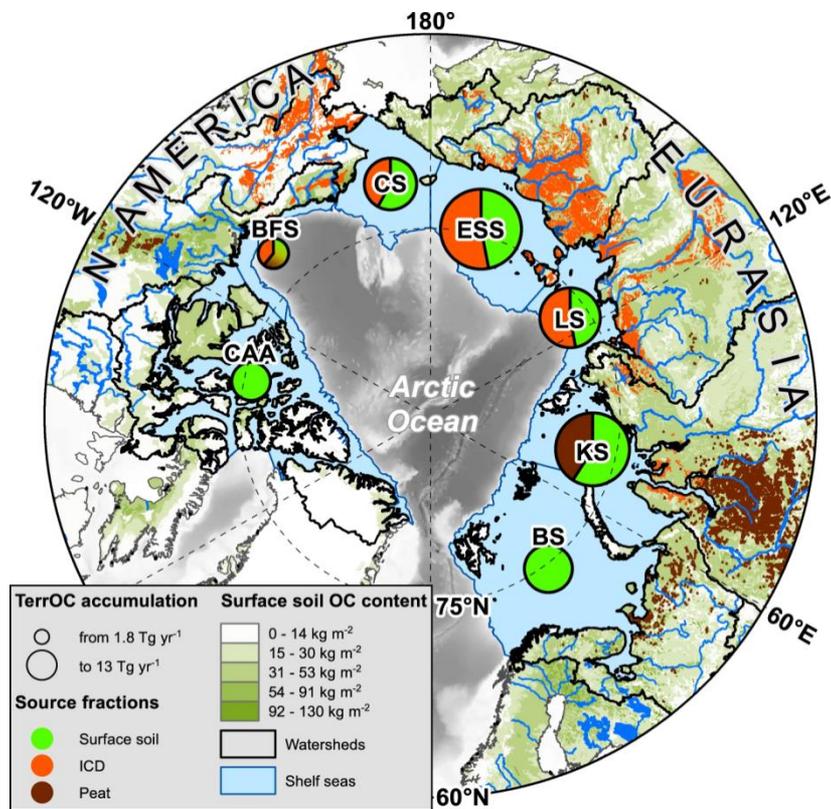
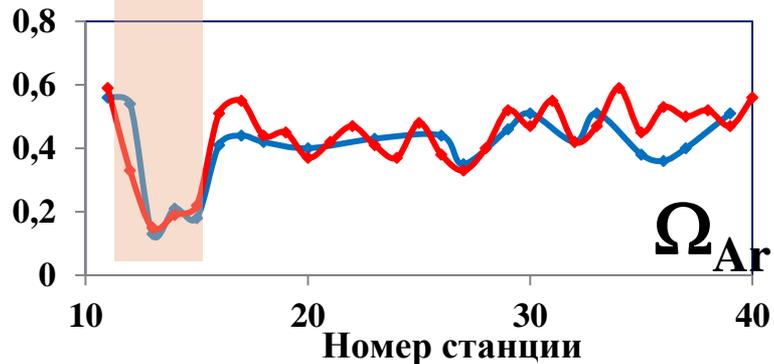
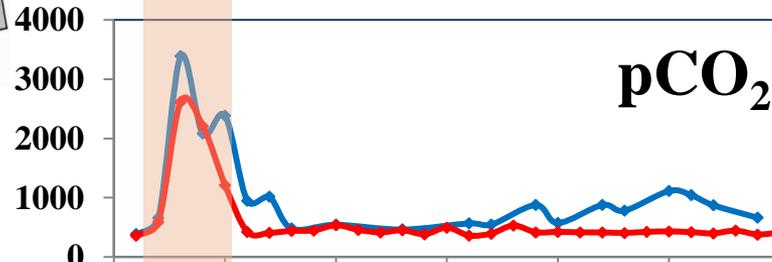
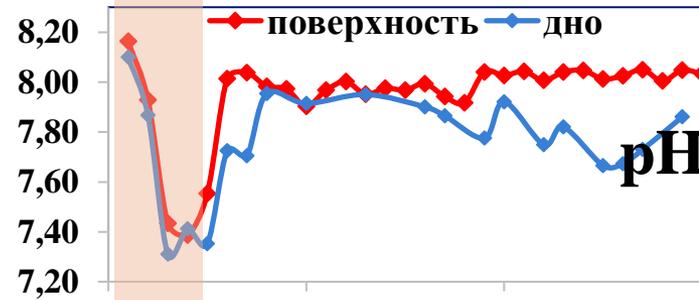
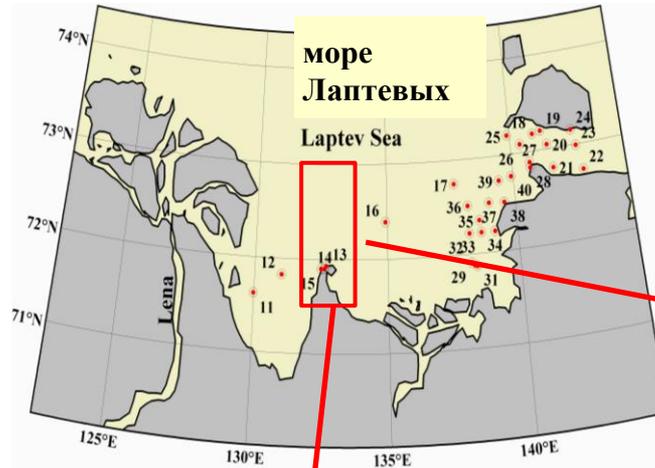
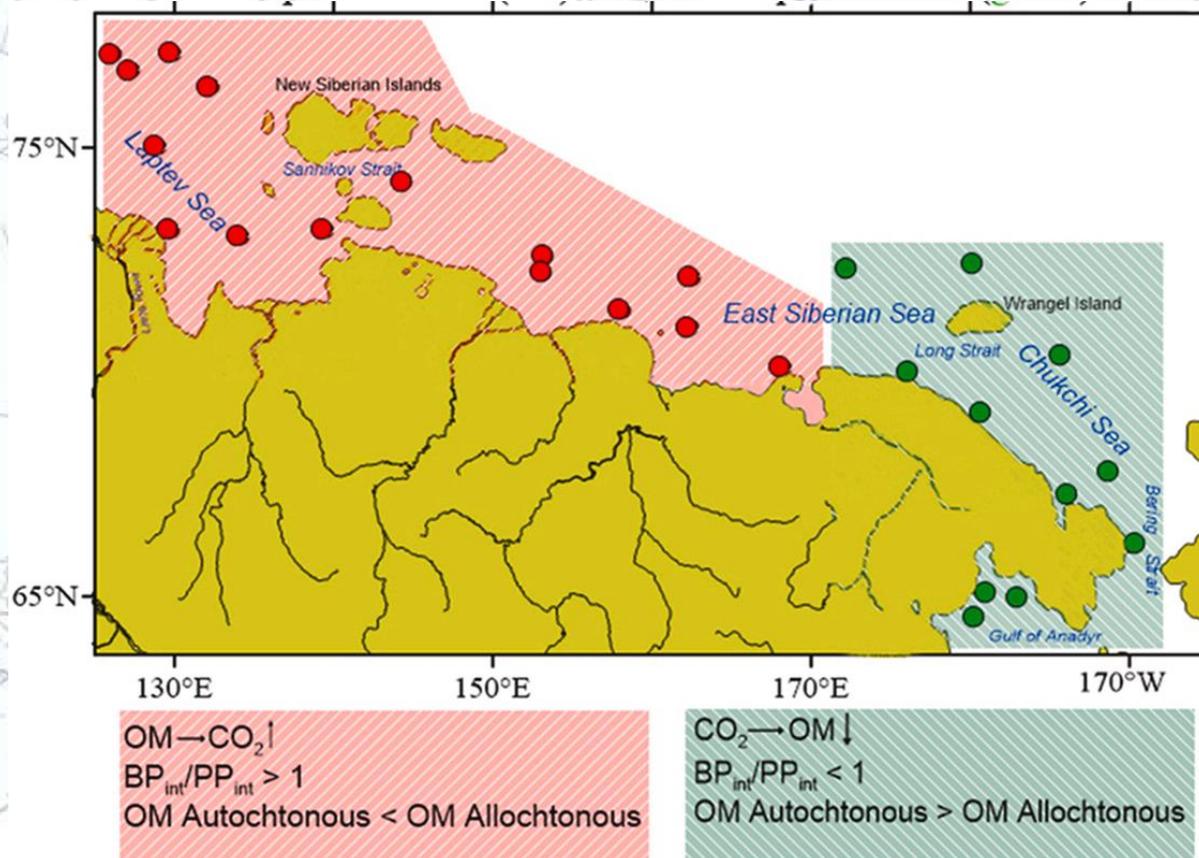


Рис. 1. Основными источниками ОВ наземного происхождения в осадках шельфа Северного Ледовитого океана являются почвы, ледовый комплекс (ЛК), торф. Наиболее мощным источником эрозионного ОВ является бассейн Восточно-Сибирского моря, где была исследована межгодовая мезомасштабная изменчивость изотопного и молекулярного состава взвешенного ОВ (РОС) мобилизованного из ЛК: РОС/TN отношение во взвешенном ОВ (а), $\delta^{15}\text{N}$ (%) во взвешенном ОВ (б). Пространственное распределение фенолов лигнина (в). Количественные оценки фракций почвы (зеленый цвет), ЛК (оранжевый цвет), торфа (коричневый цвет), и скоростей аккумуляции общего ОВ в осадках всех арктических морей (г).

Геологический фактор определяет экологию вод: Было доказано, что аномальные величины pCO_2 , pH и Ω_{Ar} обнаружены в прибрежной зоне МВА обусловлены окислением эрозионного углерода (Доклады РАН, 1999; Nature Geoscience, 2016; Frontier Mar. Sci, 2023)



Две биогеохимические провинции выделены на акватории Восточно-арктических морей на основе количественных соотношений между продукцией фитопланктона и активностью гетеротрофного бактериопланктона

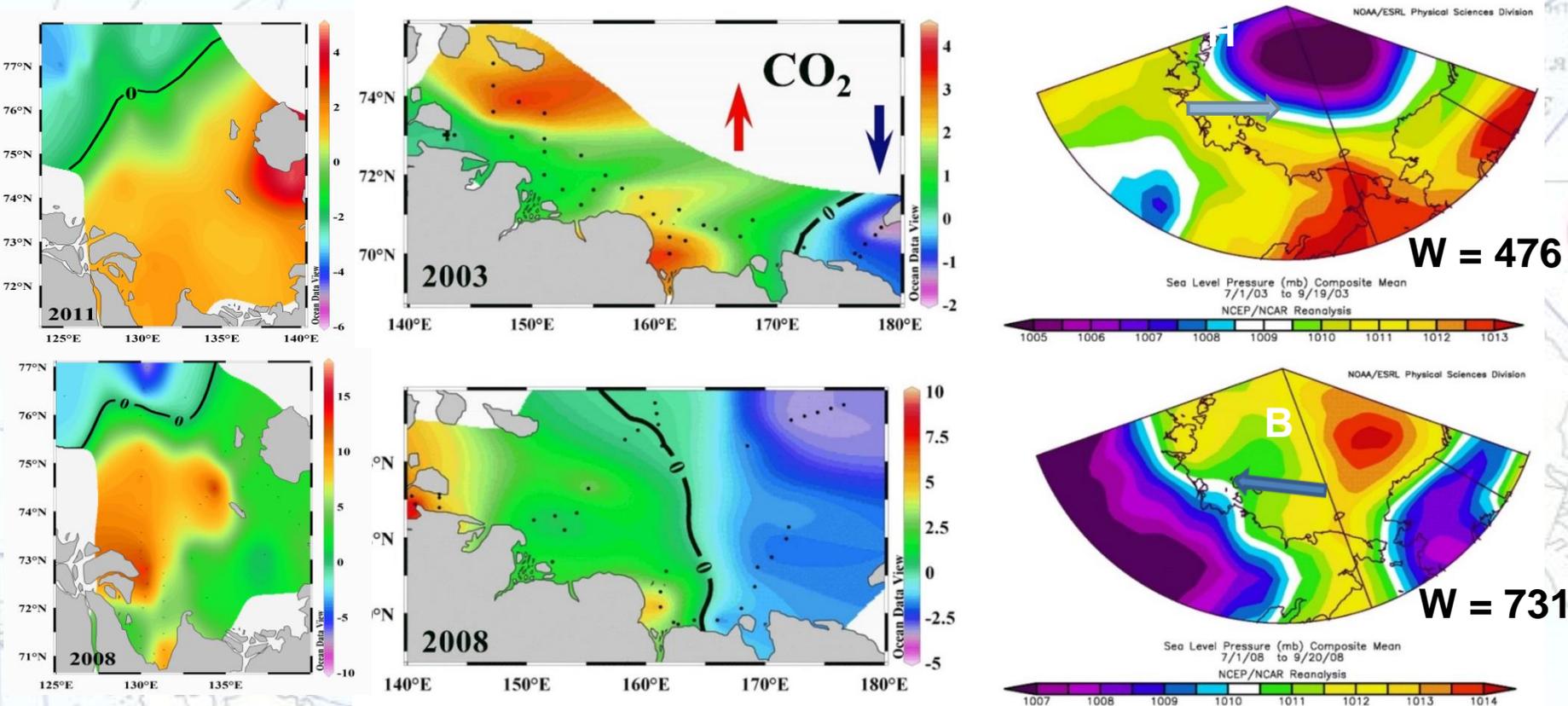


Западная гетеротрофная провинция - низкая первичная продукция, высокая активность гетеротрофного бактериопланктона, растущего на аллохтонном органическом веществе, и **эмиссия CO₂ в атмосферу.**

Восточная автотрофная провинция - высокая первичная продукция, сбалансированная гетеротрофной деятельностью бактериопланктона, и **сток атмосферного CO₂.**

Rusanov I.I., Savichev A.S., Zasko D.N., Sigalevich P.A., Pipko I.I., Pugach S.P., Pimenov N.V., Semiletov I.P.
Primary production and microbial heterotrophy in the Siberian arctic seas, Bering Strait, and Gulf of Anadyr,
Bering Sea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2024;
Semiletov et al., *Geophys. Res. Lett.*, 2005; Pipko et al., *Biogeosciences*, 2011

Значительная часть акватории Восточно-арктического шельфа – поставщик CO₂ в атмосферу - климатический фактор

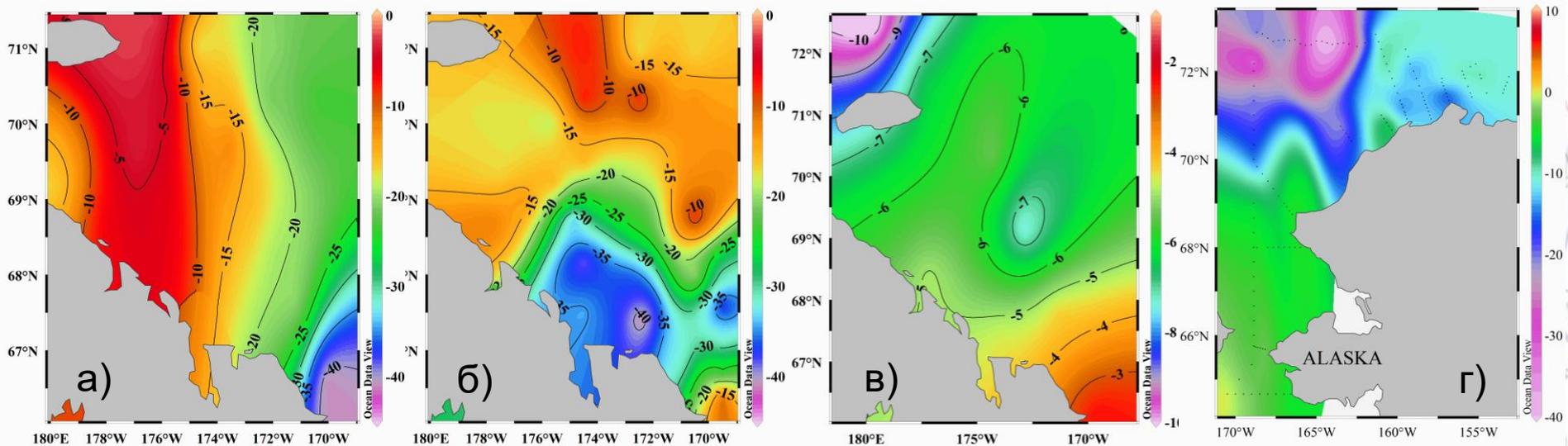


Потоки CO₂ (ммоль/(л сутки) между океаном и атмосферой в море Лаптевых (слева), в Восточно-Сибирском море, поля приземного давления (mb) в летний сезон 2003 и 2008 гг. и суммарный объем речного стока (км³) в 2003 и 2008 гг.

В течение лета с шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в атмосферу поступает примерно **3.3 Tg C-CO₂**

Воды Чукотского моря интенсивно поглощают атмосферный CO_2 в теплый сезон

По минимальным оценкам, в летне-осенний сезон (сентябрь), когда фотосинтетическая активность уже снижена, вся открытая акватория Чукотского моря за месяц может абсорбировать из атмосферы ~ **2.8 Тг C- CO_2** , и не менее **10 Тг C- CO_2** за сезон открытой воды



Распределение величин потоков CO_2 в системе океан-атмосфера ($\text{mmol m}^{-2} \text{сутки}^{-1}$) в конце августа – сентябре 2000 (а), 2002 (б), 2011 (в) и 1996 (г) гг. Отрицательные величины соответствуют потоку CO_2 в море.

Pipko et al., 2002, *Progress in Oceanography*; Пипко и др., 2006, ДАН, Semiletov et al., 2007, *Journal of Marine Systems*; Pipko et al., 2015, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*

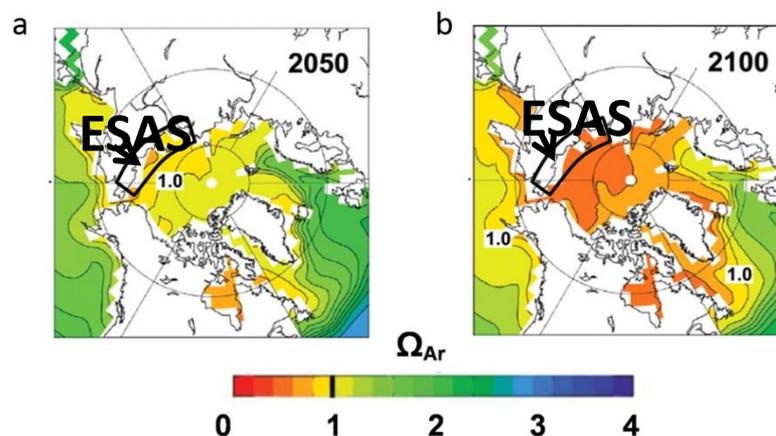
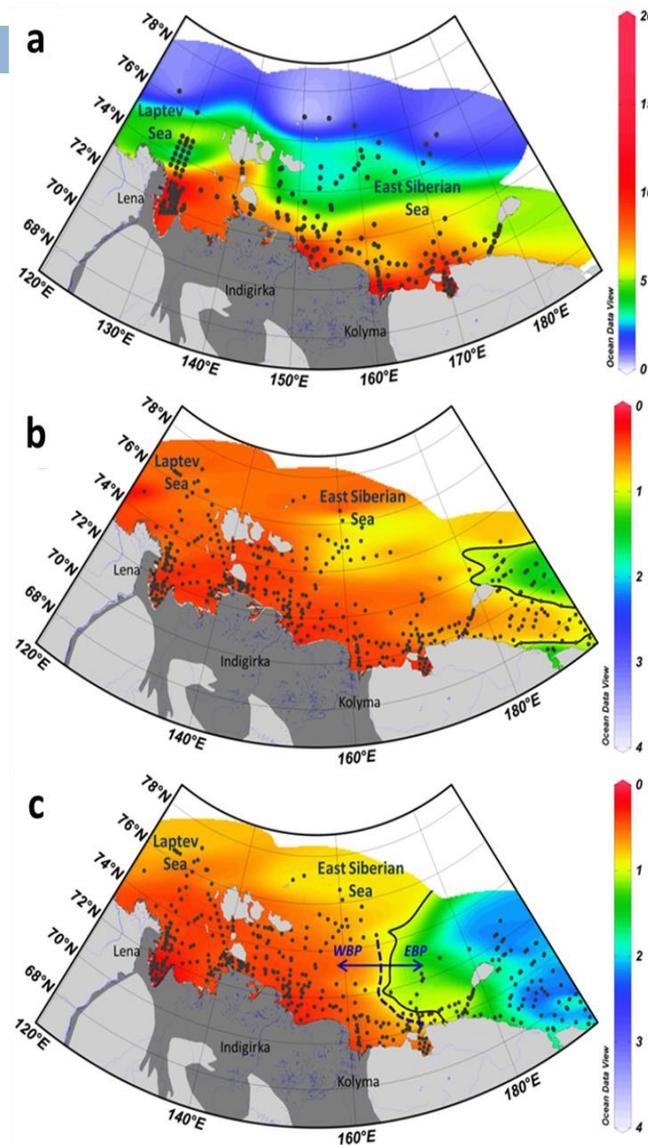
Сток атмосферного CO₂ через лед- неучтенный фактор CO₂ баланса в Арктике

Весеннее потепление и таяние льдов приводит к увеличению фотосинтеза подо-льдом, что приводит к поглощению атмосферного CO₂ через лед. **Первая оценка выполненная для Северного Ледовитого океана дает величину близкую к 40 ТГ C-CO₂**, что значительно превышает эмиссию CO₂ из гетеротрофных провинций МВА

The effects of summer temperature and PAR increase on the sea-ice/sub-ice water ecosystem is expected to enhance Arctic Ocean-scale sinks. We evaluated the significance of this Arctic sea-ice air CO₂ sink, assuming that **mean downward turbulent flux** (~0.005 mg CO₂ m⁻² s⁻¹) obtained over fast ice in June is representative of the entire Arctic Ocean ice during melting (>50 days). It is very a rough estimate though wide distribution of deep melt ponds and increased brine drainage over multi-year ice and flight data give us a clue that summertime multi-year ice can become gas permeable. Estimated total air CO₂ absorption by sea-ice would be 150 TG CO₂ (40 TG C-CO₂) per summer.

Semiletov, I. P., Makshtas, A., Akasofu, S.-I., & L Andreas, E. (2004). **Atmospheric CO₂ balance: The role of Arctic sea ice.** *Geophysical Research Letters*, **31**(5),L05121. <https://doi.org/10.1029/2003gl017996>

Экология: асидификация морей Восточной Арктики за счет окисления эрозийного ОВ и распресняющего. эффекта рек-экстремально низкие значения Ω_{Ar}



Асидификация МВА уже зашкалила уровень Ω_{Ar} предсказанный АМАР (2013) для 2100

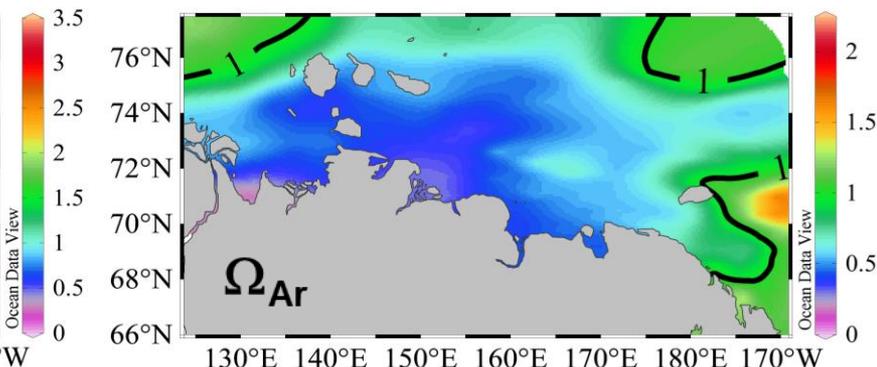
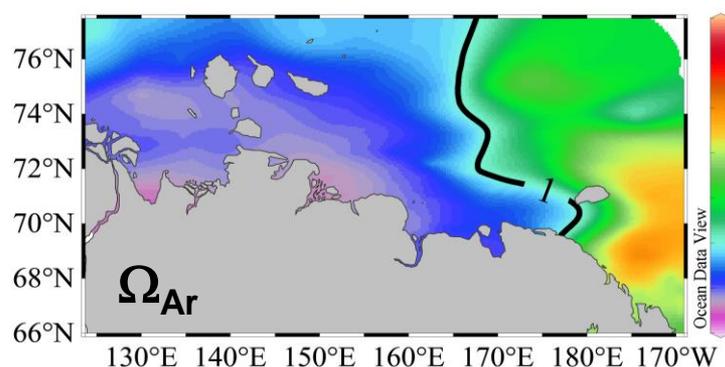
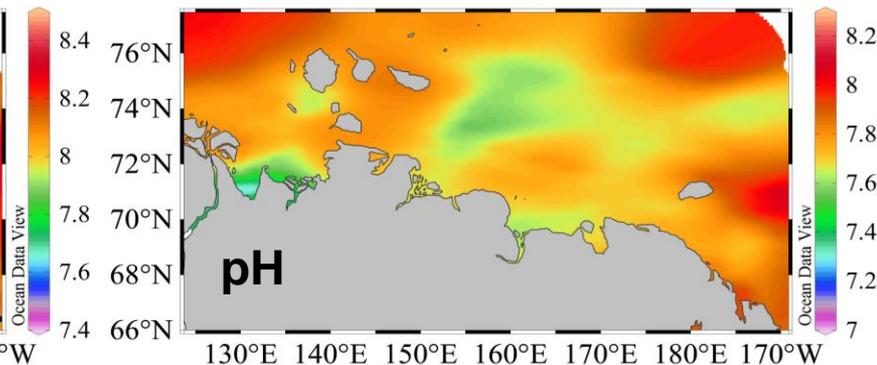
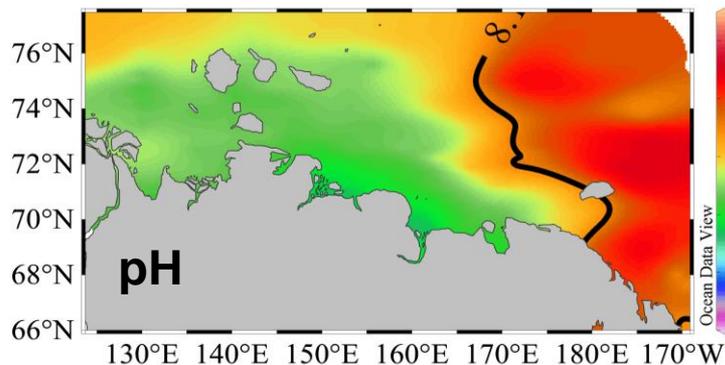
Предполагается усиление асидификации вследствие возрастающей эрозии берегов (ЛК) и стока рек, что может привести к околонулевым значениям Ω_{Ar} и серьезным экологическим последствиям

Воды Восточно-арктического шельфа – экстремально подкисленная и коррозионная зона Мирового океана

- экологический фактор

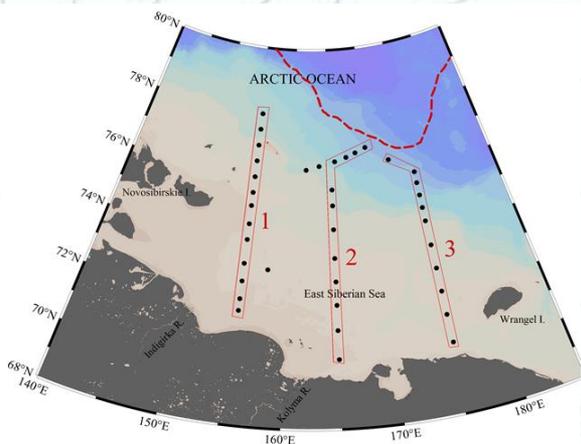
поверхностный слой

придонный слой



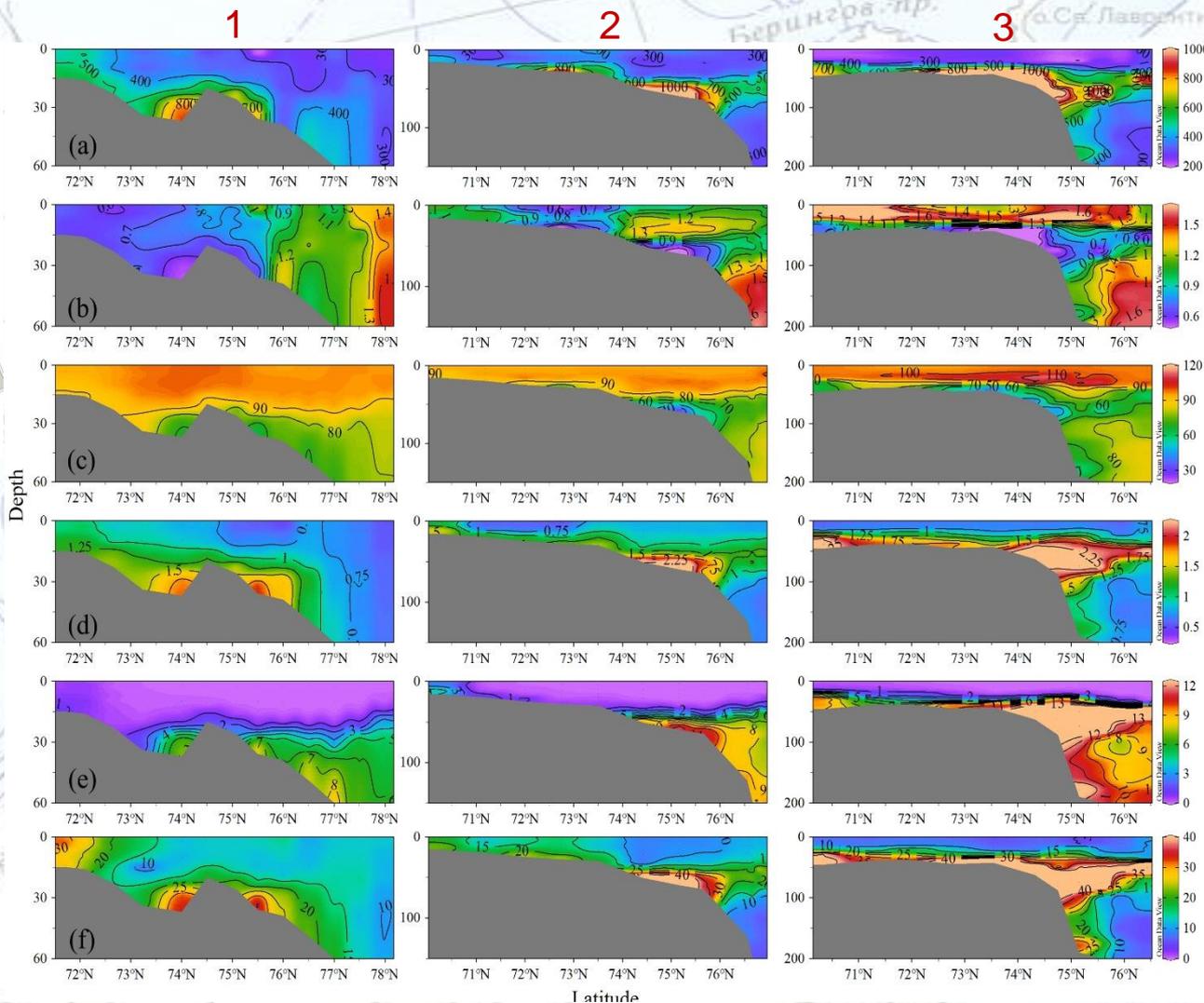
Экология

МВА – источник коррозионных вод в бассейн Северного Ледовитого океана



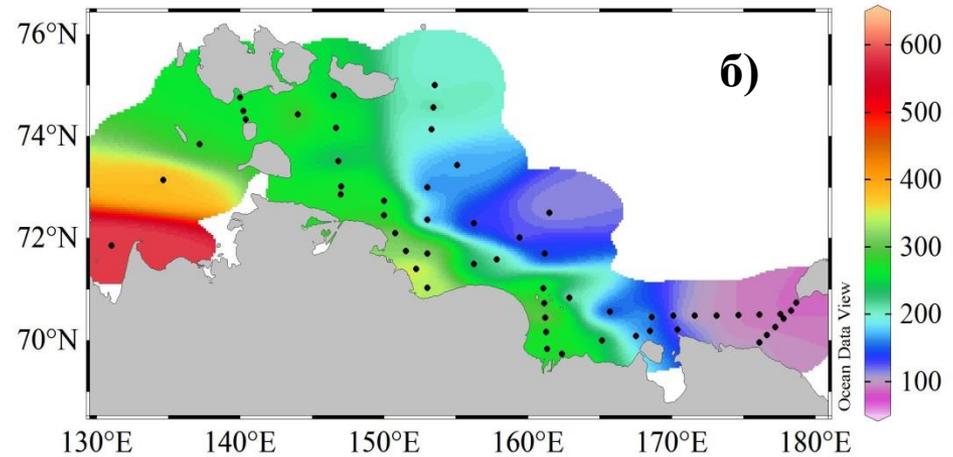
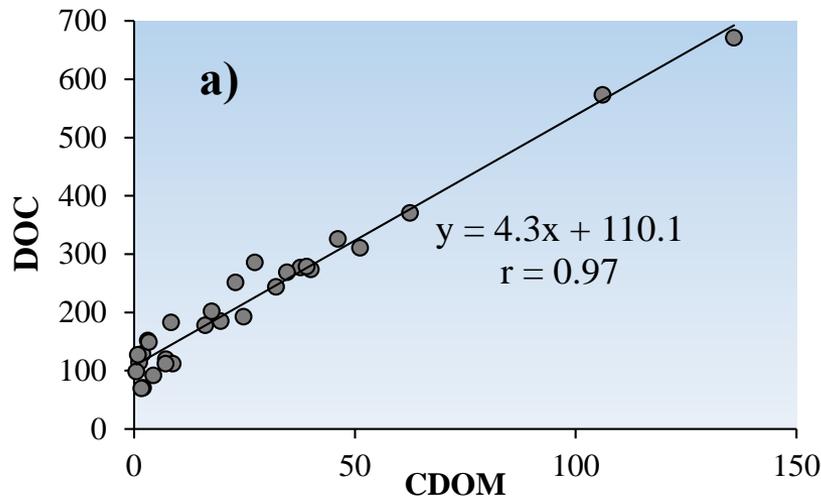
Район работ

- (a) $p\text{CO}_2$, мкАТМ
- (b) Ω_{Ar}
- (c) O_2 , %
- (d) PO_4^{3-} , мкмоль/л
- (e) NO_3^- , мкмоль/л
- (f) SiO_2 , мкмоль/л



Pipko I., Pugach S., Semiletov I., Konstantinov O. Dynamics of the Seawater Carbonate System in the East Siberian Sea: The Diversity of Driving Forces, *Water*, 2023.

Новые методы



Корреляция между концентрациями DOC ($\mu\text{моль л}^{-1}$) и CDOM в поверхностных водах прибрежно-шельфовой зоны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (сентябрь 2004 и 2008 гг.) (а) и пространственное распределение DOC, восстановленное по измеренным значениям $\text{CDOM}_{\text{in situ}}$ (б).

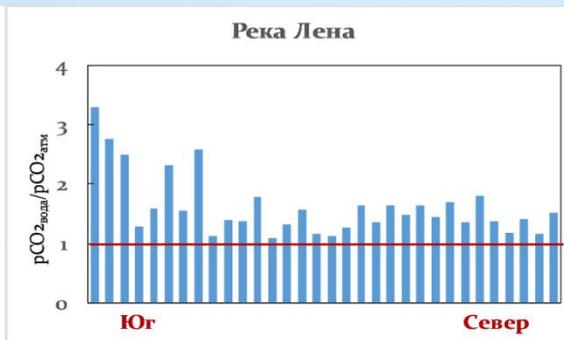
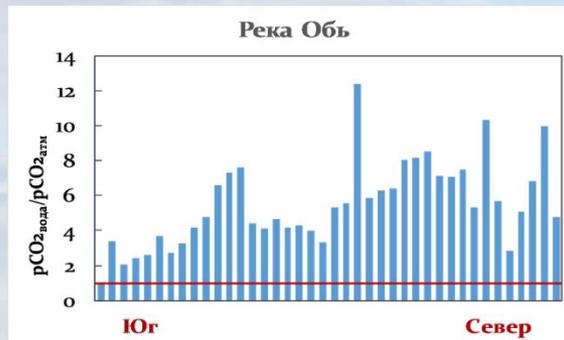
По спутниковым данным можно восстановить поля DOC за последние 30 -40 лет

Пугач С. П., Пипко И. И., Семилетов И. П., Сергиенко В. И. Оптические характеристики растворенного окрашенного органического вещества на Восточно-Сибирском шельфе // Доклады Академии наук, 2015, 465, № 5, С.608-611.

Pugach, S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson Ö., Bondur V.G., Ruban A.S. and Semiletov I.P. Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // Ocean Science, 14, 87-103, 2018.

Эмиссия CO₂ и взаимосвязь с величинами РОУ и оптическими параметрами РОВ

Воды сибирских рек являются поставщиками CO₂ в атмосферу, при этом «мерзлотные» реки являются менее значимым источником CO₂.



Параметр, река	Сплошная мерзлота, %	$\Delta p\text{CO}_2$, $\mu\text{атм}$	U , м сек^{-1}	k , см час^{-1}	FCO_2 , $\text{ммоль м}^{-2} \text{сут}^{-1}$
Обь, $n = 41$	1	1556 ± 855	3.9 ± 1.9	6.1 ± 5.4	102.1 ± 130.2
Лена, $n = 33$	77	248 ± 211	6.5 ± 2.5	13.1 ± 8.7	30.6 ± 29
Кольма*	100	224	-	16.7	41.7
Анадырь, $n = 10$	100	115 ± 89	3.8 ± 0.3	4.0 ± 0.6	4.9 ± 4.3

*Denfeld et al., 2013

Параметр, река	РОУ, мг л^{-1}	a_{254} , м^{-1}	$S_{275-295}$, $\mu\text{м}^{-1}$	SUVA, $\text{л мг}^{-1} \text{м}^{-1}$
Обь, $n = 41$	0.84	0.75	-0.56	0.45
Лена, $n = 33$	0.61	0.67	-0.78	0.52
Анадырь, $n = 10$	0.51	0.52	-0.27	0.56

Годовой поток CO₂ в атмосферу из рек мира - **650 · Тг С***.

Эмиссия CO₂ в атмосферу в результате природных пожаров в водосборе сибирских рек (июль 2016 г.) - **3.5 · Тг С****.

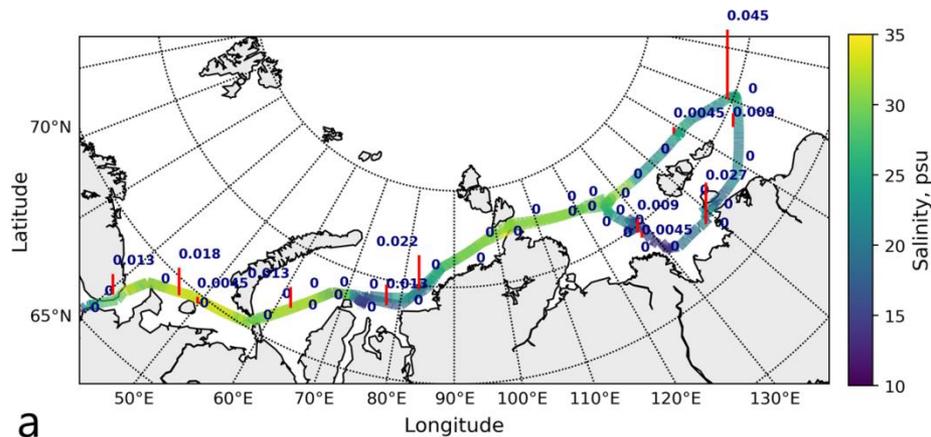
Поток CO₂ за месяц (июль) из реки Оби (среднее и нижнее течения) в атмосферу **по нашим минимальным оценкам - 0.2 · Тг С**

*Lauerwald et al., 2015 **<https://climate.copernicus.eu/>

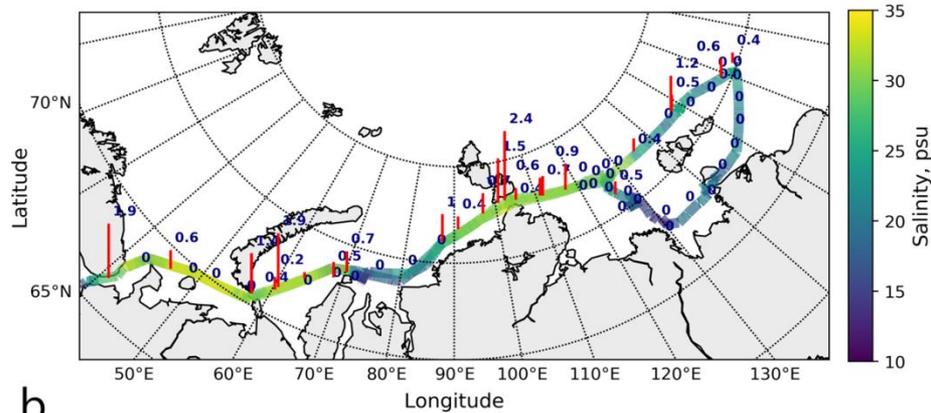
Установлены устойчивые корреляционные связи между содержанием растворенного CO₂ и оптическими характеристиками РОВ, свидетельствующие о значимом вкладе РОВ в карбонатную химию речных вод.

Pipko et al., 2023, Journal of Hydrology

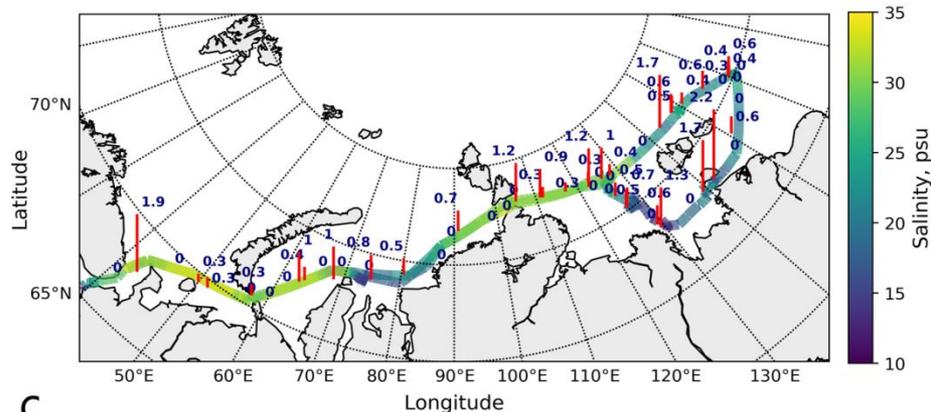
В летний сезон (июль) воды реки Оби, водосбор которой характеризуется большими запасами доступного почвенного органического вещества, а также присутствием деградирующей прерывистой многолетней мерзлоты, поставляют на арктический шельф большее количество растворенного органического и неорганического углерода, а переносимое ими РОВ в большей степени способно к фотодеградации по сравнению с РОВ восточно-сибирских рек, водосборный бассейн которых подстилается сплошной мерзлотой.



a



b



c

Экология : Избранные результаты Исследовано распределение и происхождение микропластика в водной толще акватории СМП

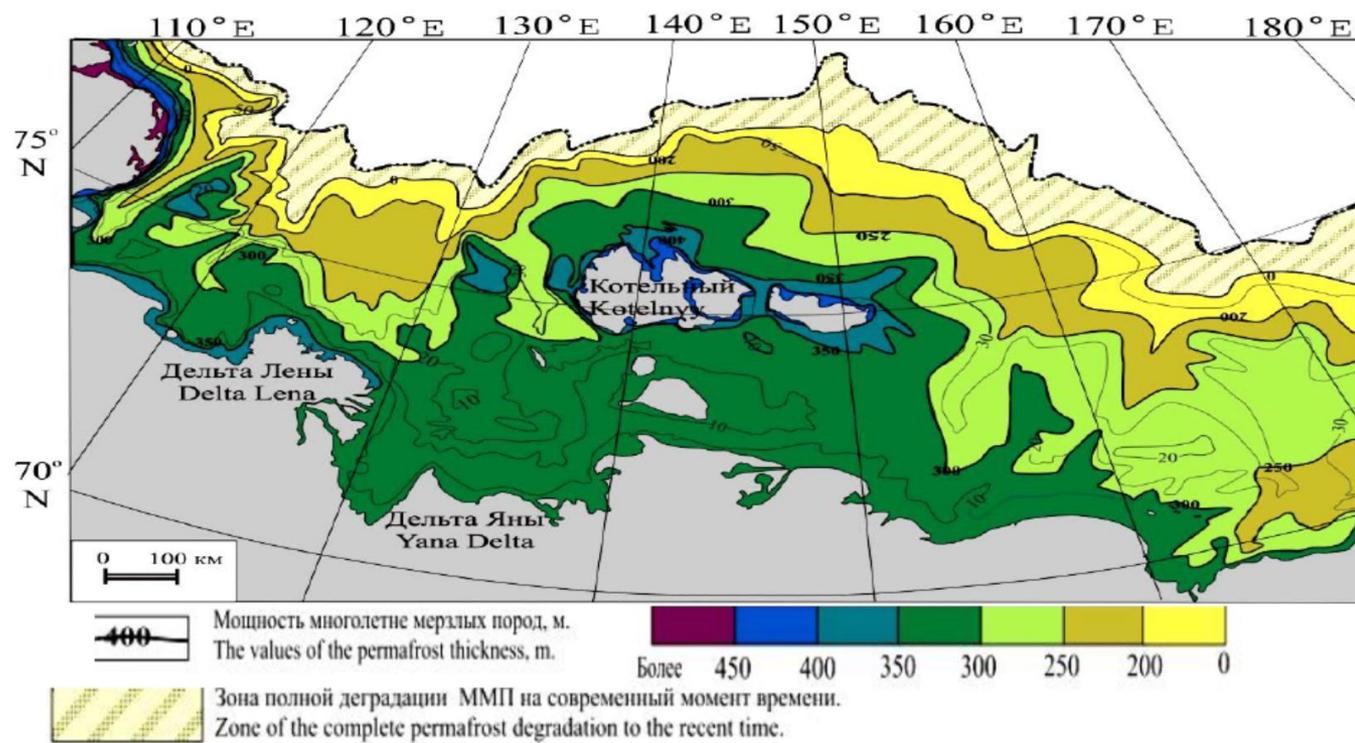
(Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers)

Показано, что основное загрязнение микропластиком обеспечивается Атлантическими и речными водами (по результатам авторской экспедиции на НИС Академик М Келдыш-2019)

a For the surface samples, $n = 48$. **b** For the subsurface samples, fragments, $n = 60$. **c** For the subsurface samples, fibres, $n = 60$.

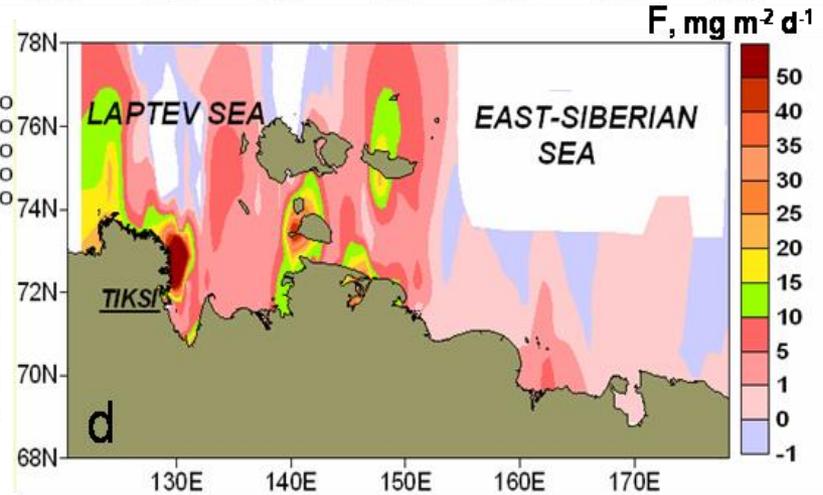
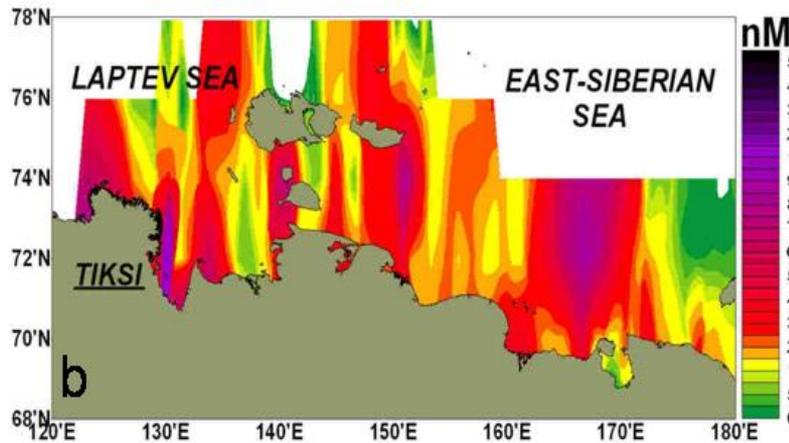
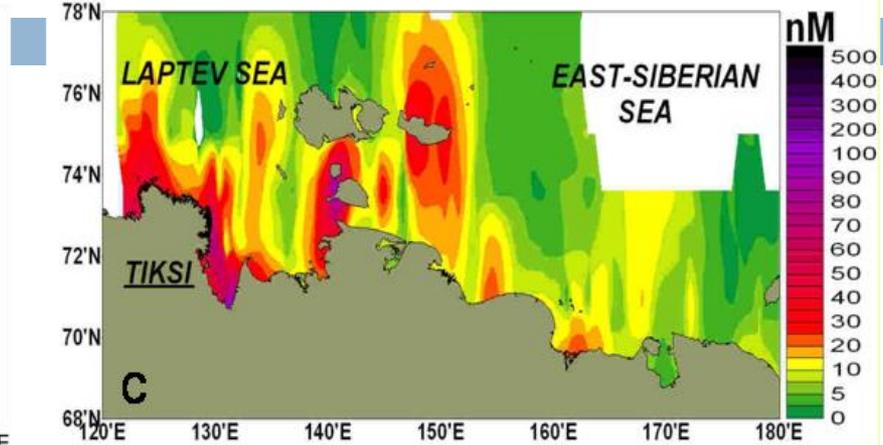
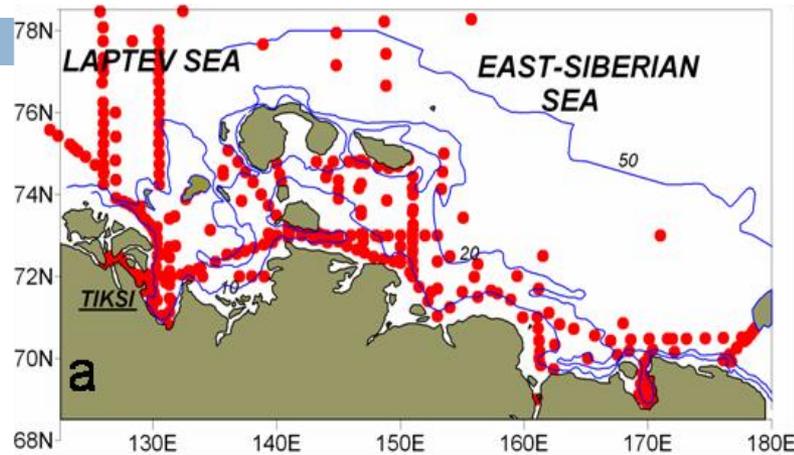
Деградация подводной мерзлоты и
эмиссии метана в водную толщу-
атмосферу

До начала 2000х было принято считать, что подводная мерзлота МВА стабильна, по-крайней мере на внутреннем и среднем шельфе, что исключало возможность разгрузки пузырькового метана в составе геологического флюида в водную толщу-атмосферу



Результаты моделирования подводной мерзлоты (Романовский и др. , 2001)

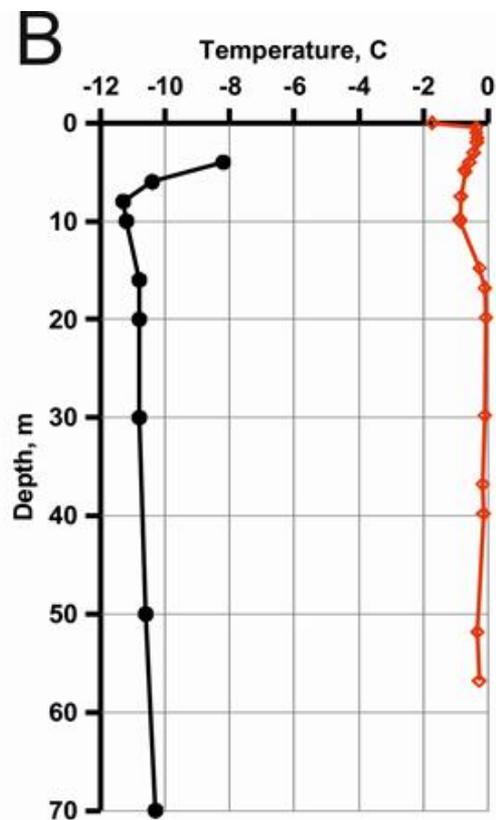
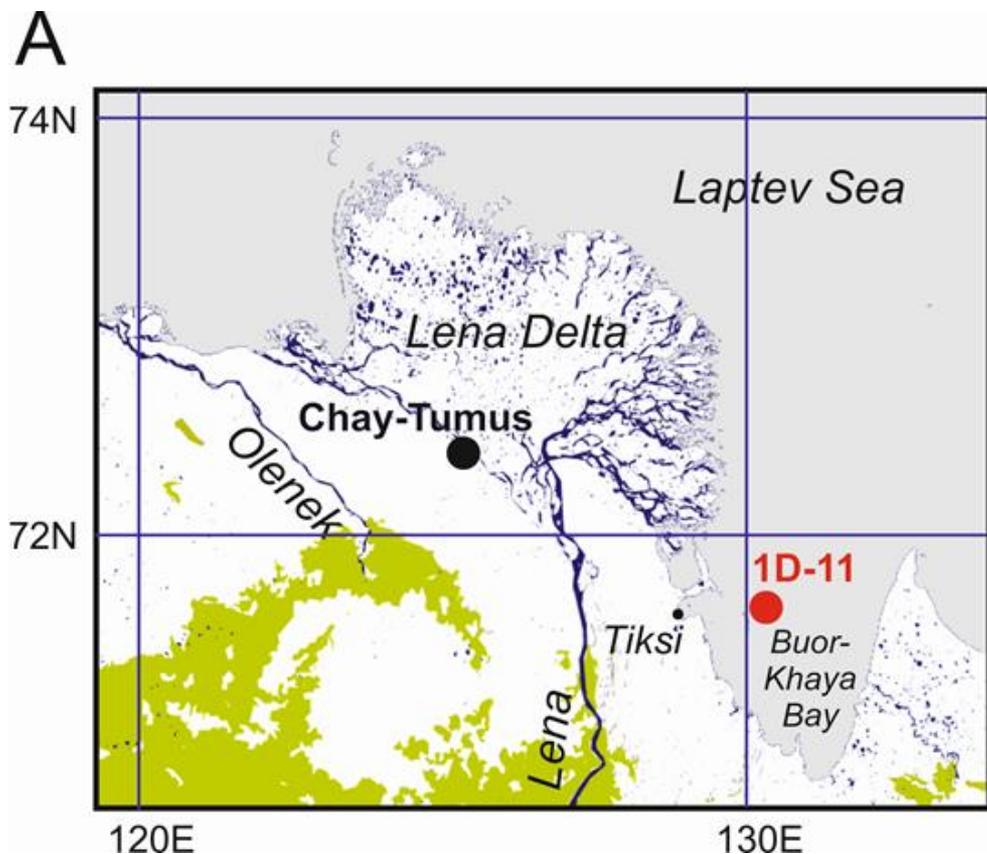
Доказано, что шельф морей Восточной Арктики является мощным источником метана в атмосферу, что свидетельствует о наличии газопроводящих путей в толще подводной мерзлоты



Величина диффузионной эмиссии метана из МВА в атмосферу как минимум соизмерима с вкладом всего Мирового океана (*Shakhova, Semiletov et al., Science, 327, March 5, 2010*). Включение пузырькового переноса увеличивает оценку эмиссии метана кратко

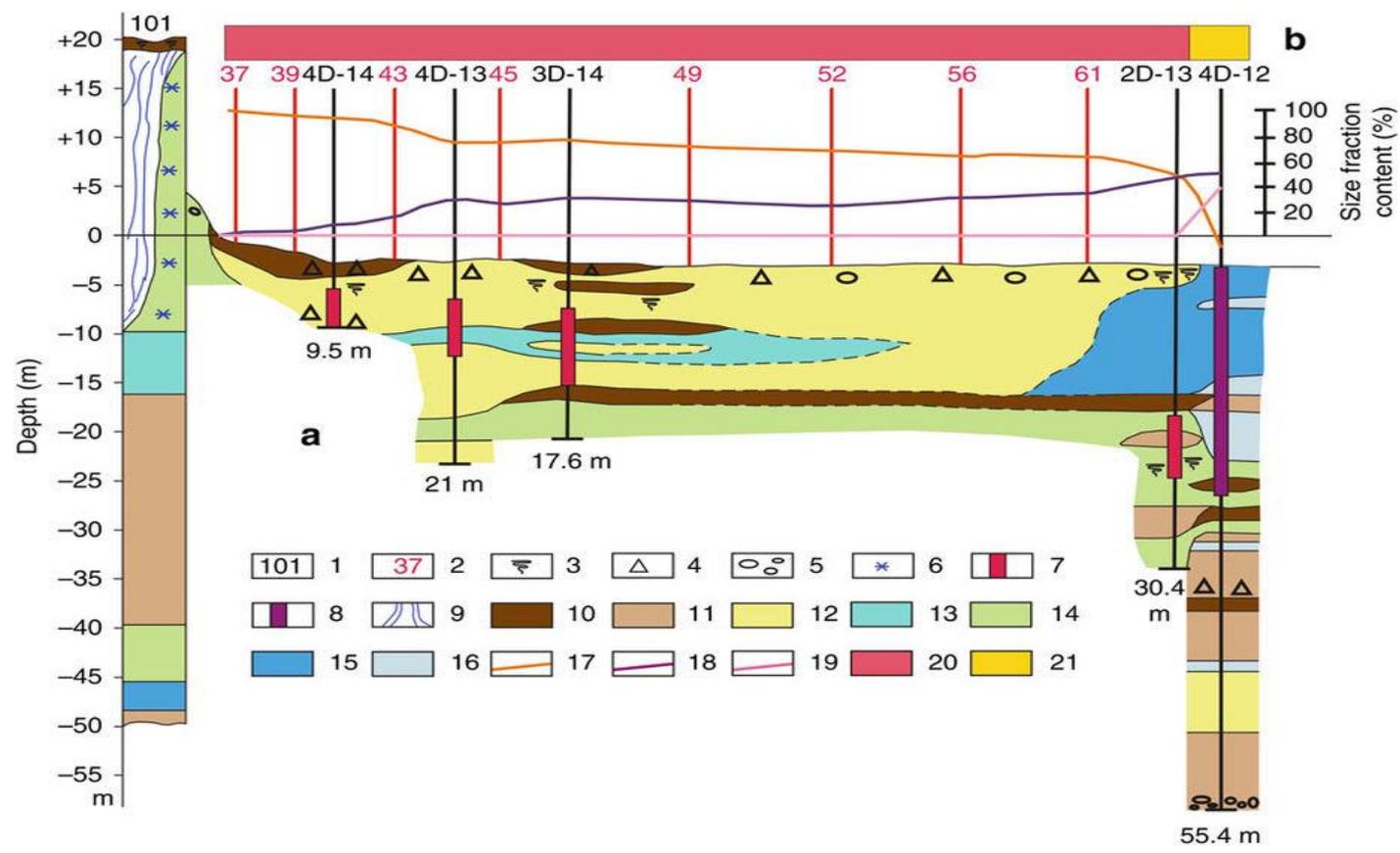
Авторская программа бурения с припайного льда (2011-2015гг)

Подводная мерзлота близка или уже находится в фазовом переходе из мерзлого в талое состояние



Подводная мерзлота примерно на 10C теплее наземной мерзлоты, и характеризуется наличием глубоких или сквозных таликов – путей разгрузки глубинного метана (Shakhova, Semiletov et al., *NatureGeosci.*, 2014)

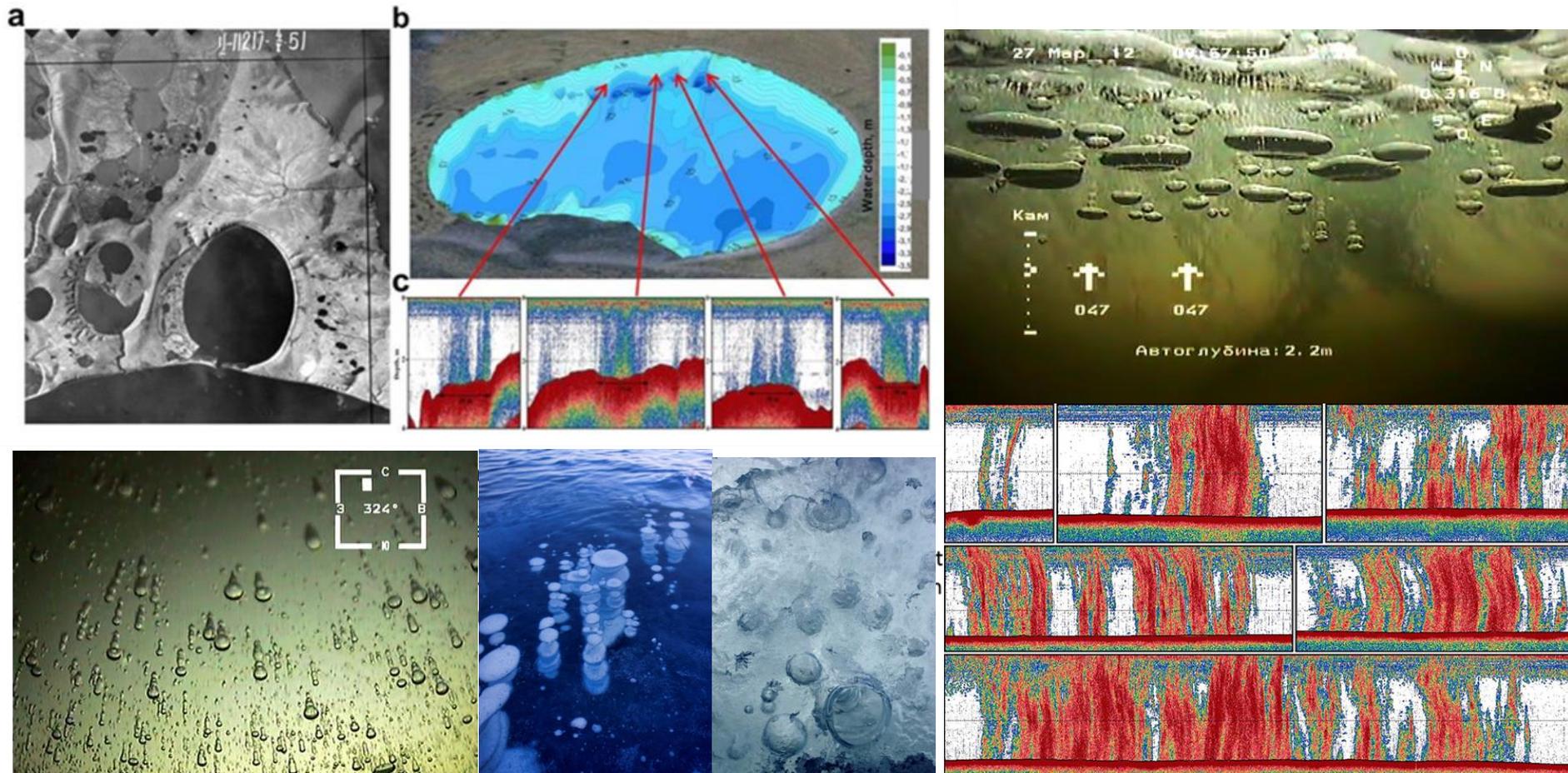
Перебуривание скважин по профилю ИМЗ СО РАН показало скорости вертикального оттаивания до 18 см в год - значительно выше модельных оценок, что необходимо учитывать при гео-инженерных изысканиях



Shakhova , Semiletov, Sergienko, Dudarev, Grigoriev, Tumskoy et al., Nature Communications, (2017)

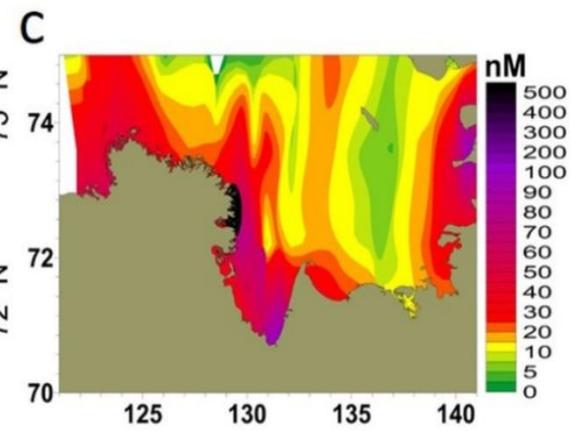
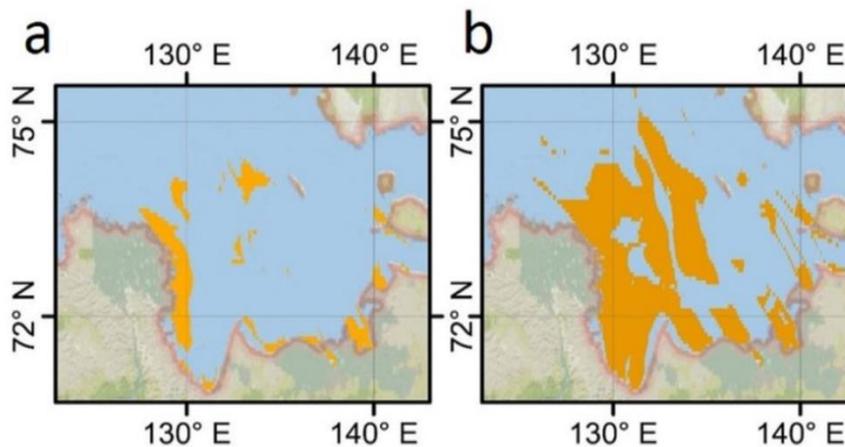
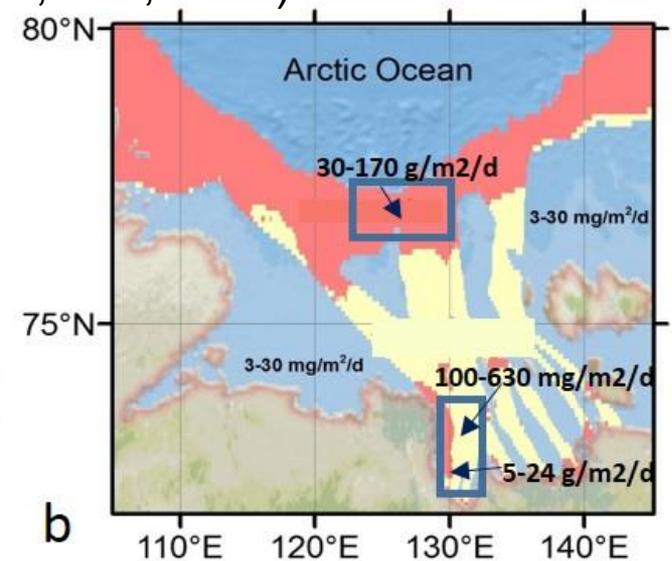
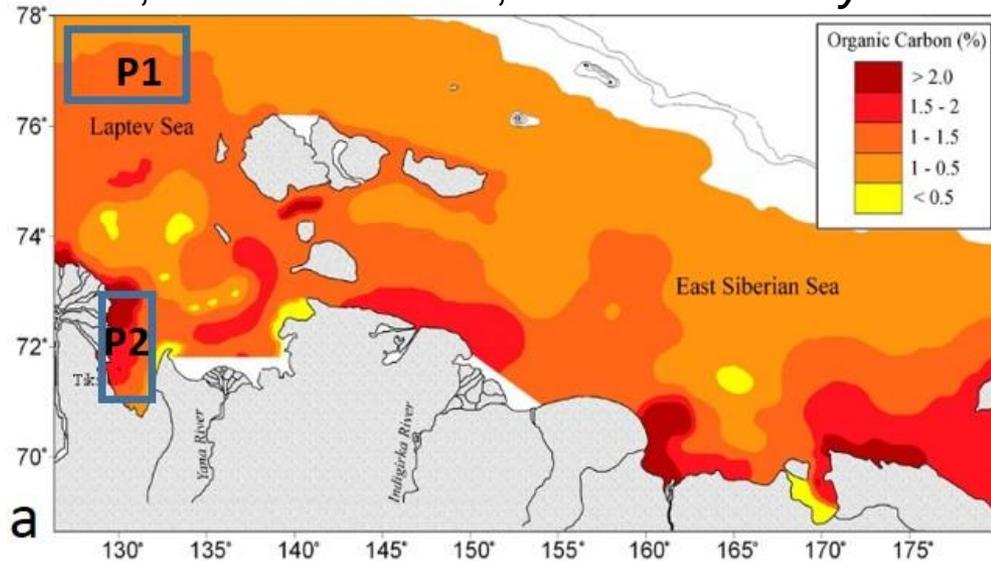
Доказано, что пузырьковый перенос является основным механизмом массивной разгрузки метана из донных осадков в воду-атмосферу МВА

В лагунах, на мелком, и глубоком шельфе



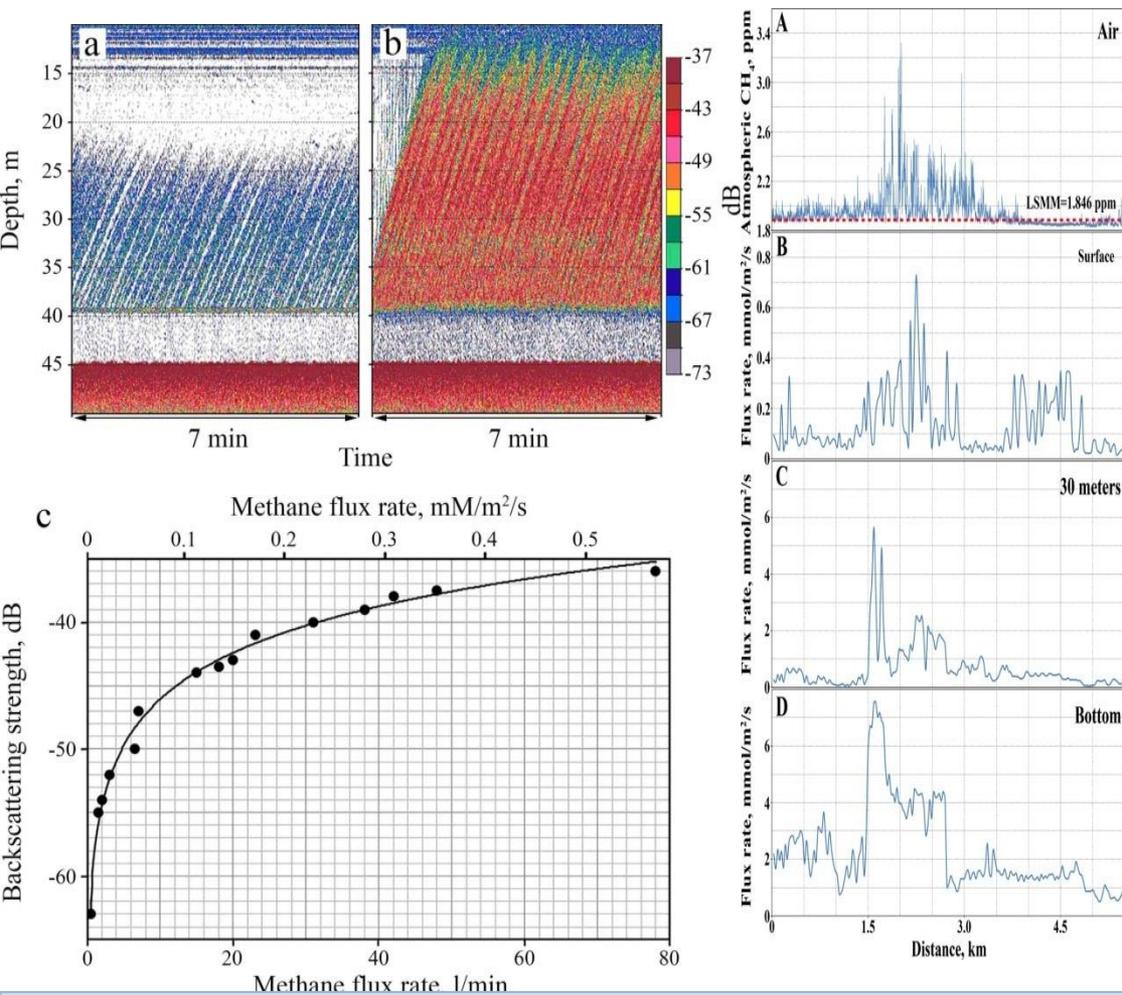
Состояние подводной мерзлоты определяет масштабы эмиссии на 5 порядков. Картирование таликов является основой для количественной оценки эмиссии метана на всем шельфе

(Shakhova, Semiletov et al., *Phil. Trans. Royal Soc. A*, 373, 2015)



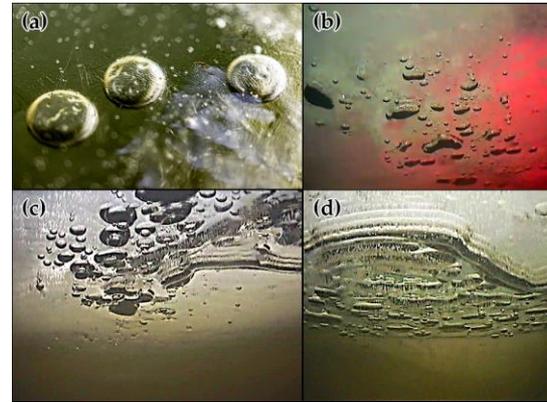
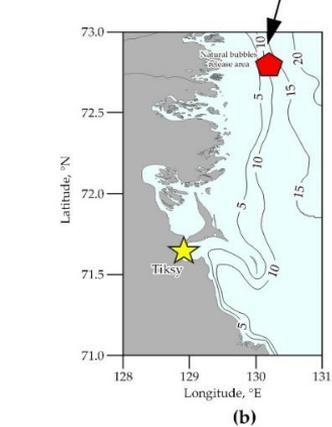
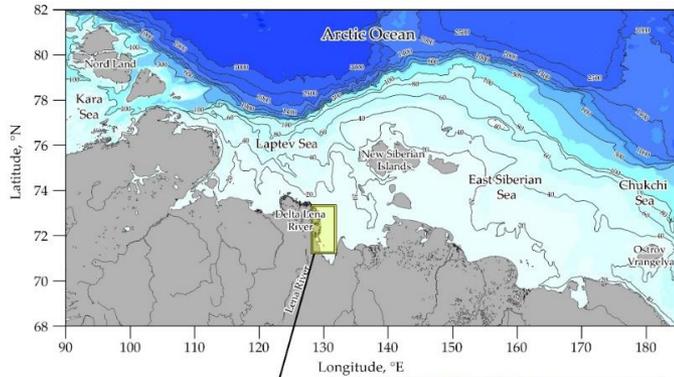
Новые методы

Абсолютная калибровка эхолота по заданным пузырьковым потокам дала возможность количественно оценивать пузырьковый в любых водоемах (море, озеро, река), а также оценивать утечки газа из подводных трубопроводов



Left: In-situ sonar calibration data. Examples of (a) an echogram recorded at a flux rate of 1.6 l/min; (b) an echogram recorded at a flux rate of 76.2 l/min. (c) The calibration curve created based on observed backscattering strength measurements at a frequency of 200 kHz. The data show a very good correlation between the flux rate and the strength of the backscattering signal; **Right:** Coordination between atmospheric levels of CH₄ and estimated fluxes of CH₄ at different depths in the underlying seawater in one of the seep field areas. (a) CH₄ mixing ratio in the air above the water surface; (b) CH₄ fluxes at the water surface (7 meters depth); (c) CH₄ fluxes at 30 m water depth; (d) CH₄ fluxes at the bottom. The red dotted line in panel (a) shows the Latitude Specific Monthly Mean (LSMM) of 1.85 ppmv established for Barrow, USA

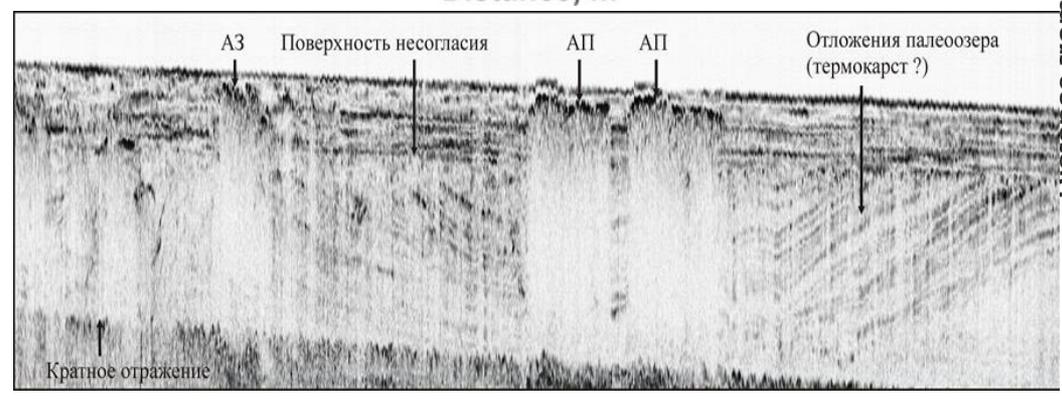
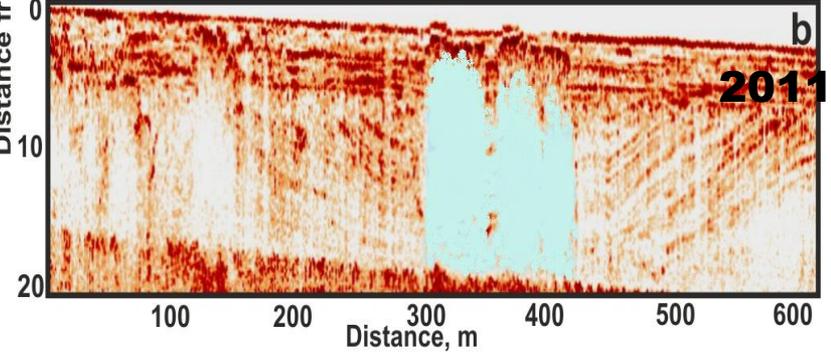
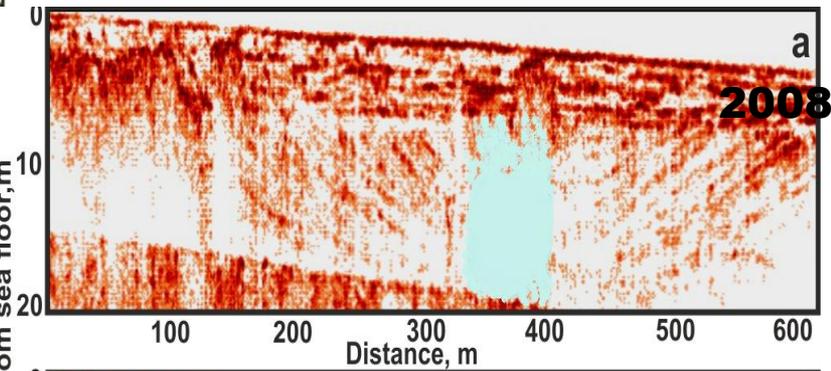
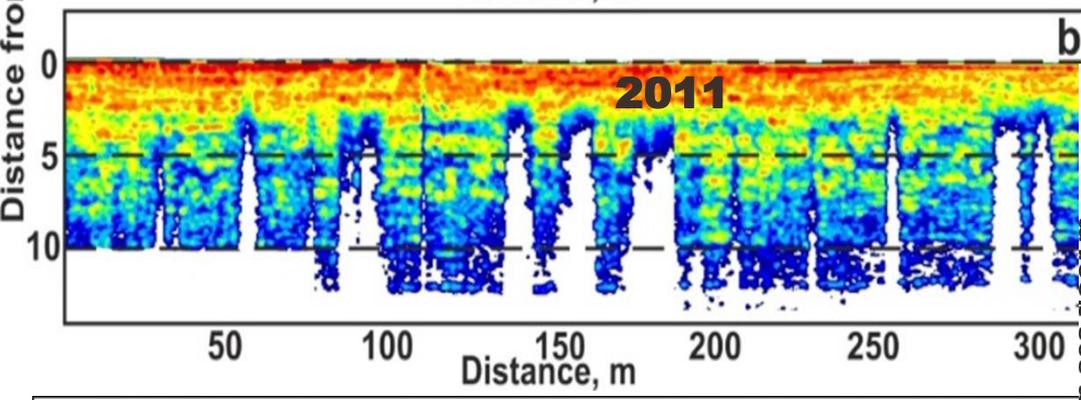
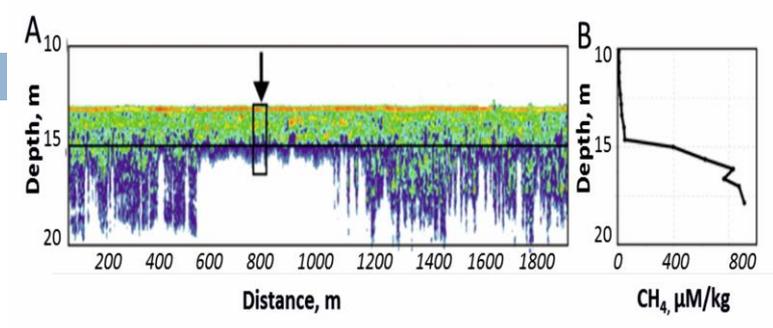
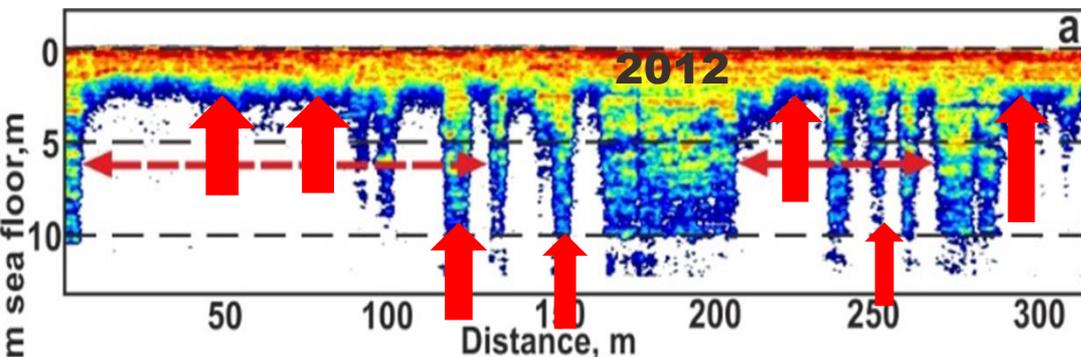
Первые зимние наблюдения потоков метановых пузырей в сибирских арктических морях (Chernykh et al., Geosciences, 2023).



Поток CH_4 , переносимый пузырьками к границе раздела вода/морской лед, оценивается примерно в $15 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \text{ CH}_4$ в сутки.

Эмиссия на два порядка выше, чем верхний диапазон эмиссии CH_4 из типичных и хорошо изученных субарктических термокарстовых озер (Черский), и на три порядка выше чем из арктических озер (Тикси) Semiletov et al., *Atmosph. Envir.*, 1996; Semiletov, 1999, *J. Atmosph. Sciences*

Доказано, что **верхний акустический рефлектор является не крышкой подводной мерзлоты**, а газовым восходящим фронтом, который движется со скоростью до 7 - 8 метров/год(!)



Борозды ледового выпахивания (*стамухи и айсберги*) являются эффективным механизмом для достижения газовым фронтом поверхности осадка и выброса метана (Shakhova, Semiletov, Sergienko et al., Nature Comm., 2017)

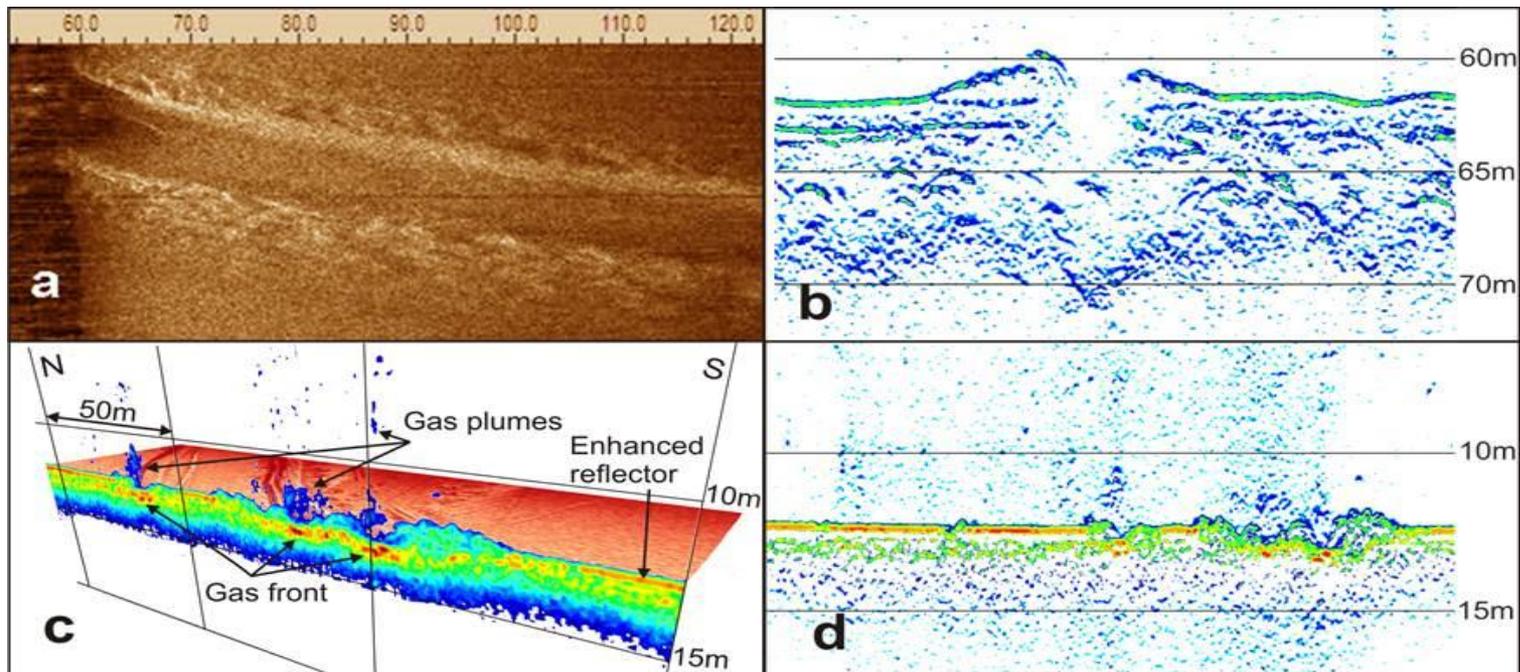


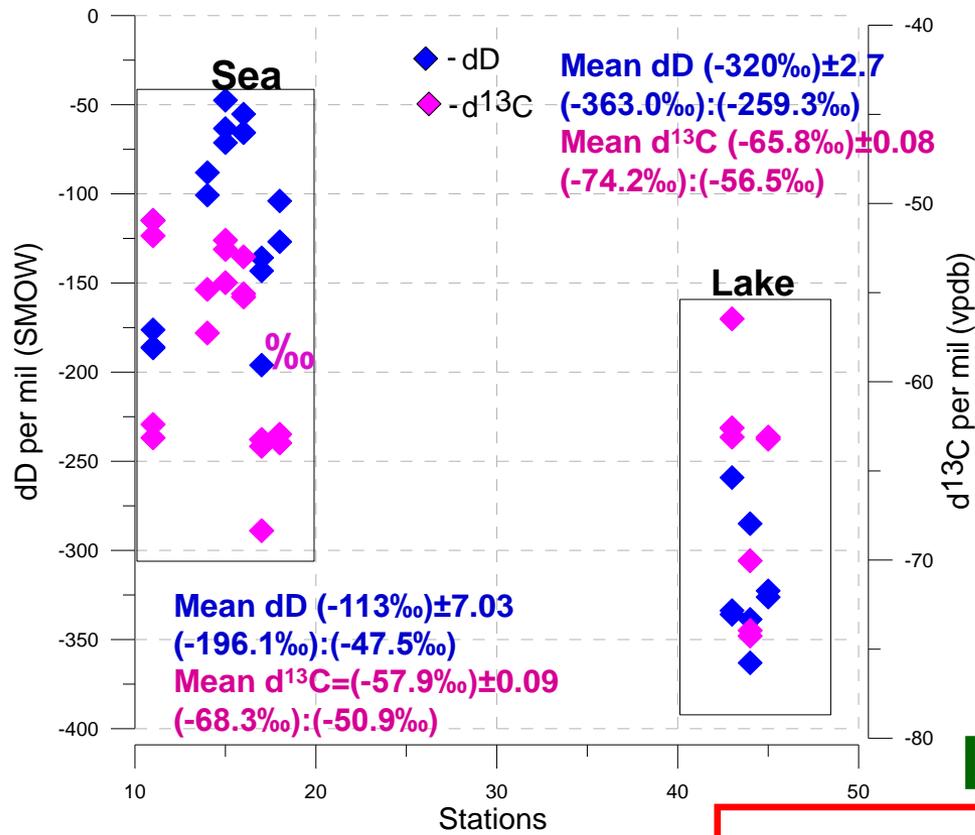
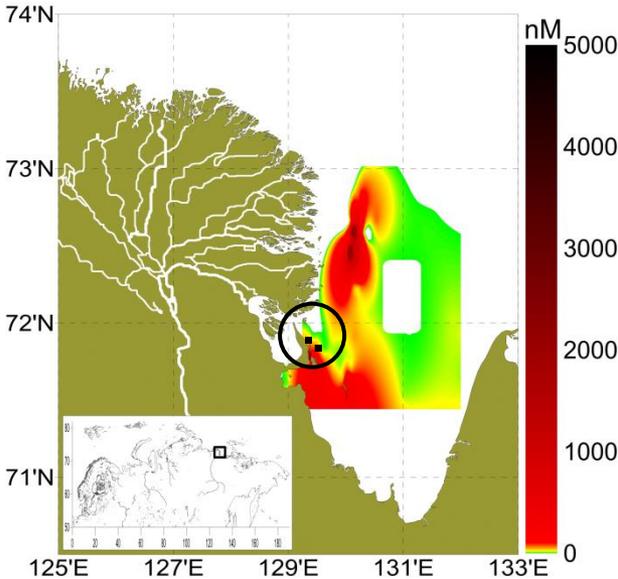
Figure 4 | Example of high-resolution seismic ice-scour images observed in the ESAS.

- a) Backscatter image showing relative size of the ice scouring scar on the sea floor.
- b) vertical profile of the ice-scouring scar demonstrating penetration as much as 8 m into the sediment.
- c) 3D perspective view of ice scouring as a mechanism providing a gas migration pathway for shallow gas to escape to the water column.
- d) hydro-acoustical image of gas release due to ice scouring .

Для оценки пулов источников метана используем метод тройных изотопов метана в комплексе с изучением геологической структуры донных осадков и изотопами благородных газов, что является необходимым условием для предсказания эмиссии метана и выявления георисков

Sea

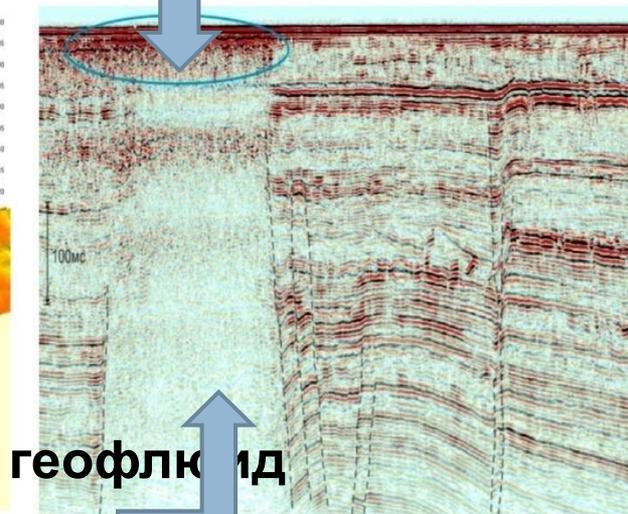
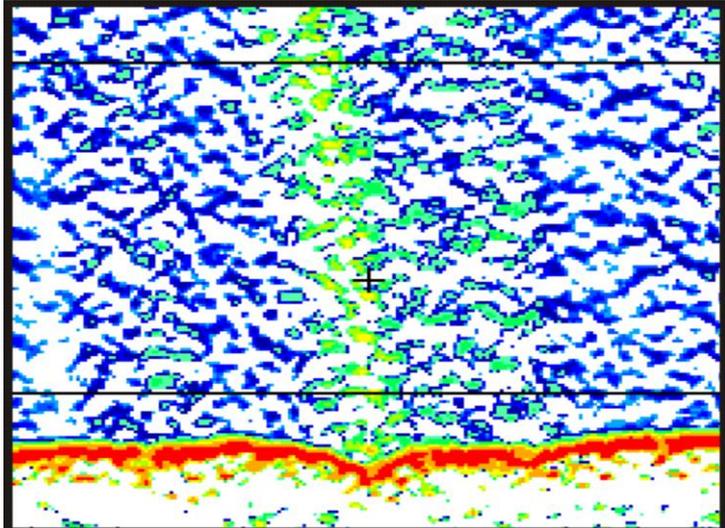
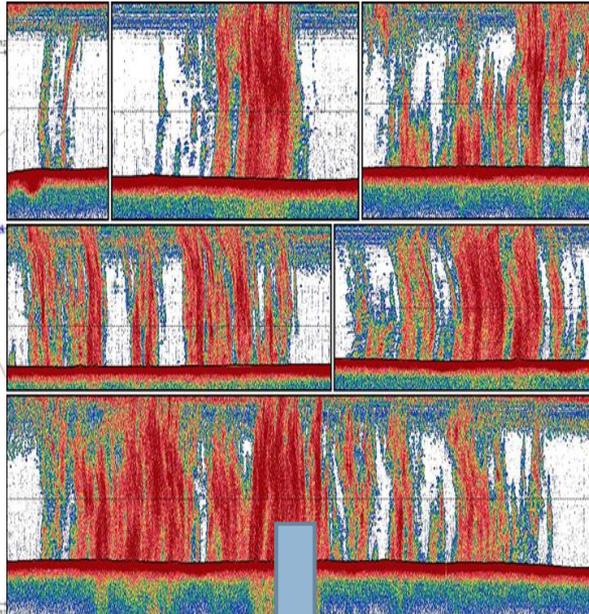
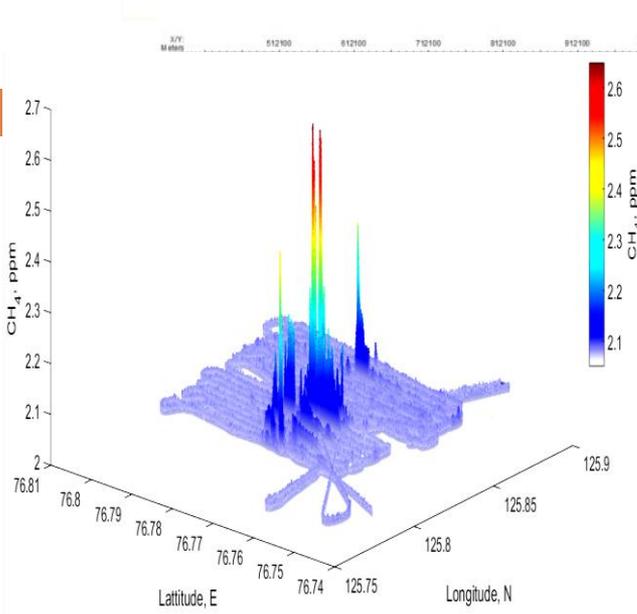
dD (- 57‰):(-325‰)
d¹³C (-35.9‰):(-109‰)
14C (0-96% mC)



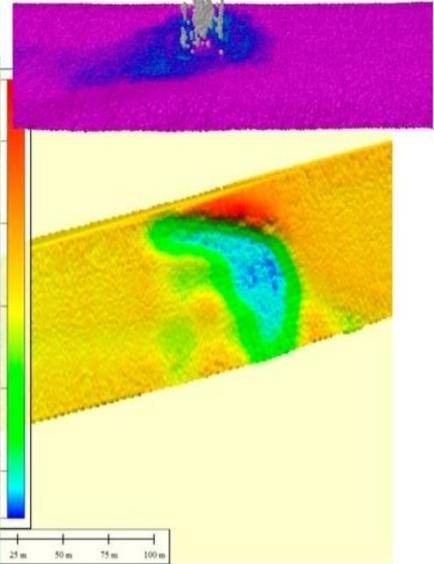
Lake

dD (-284‰):(-363‰)
d¹³C (-62.8‰):(-74‰)
14C (16-88% mC)

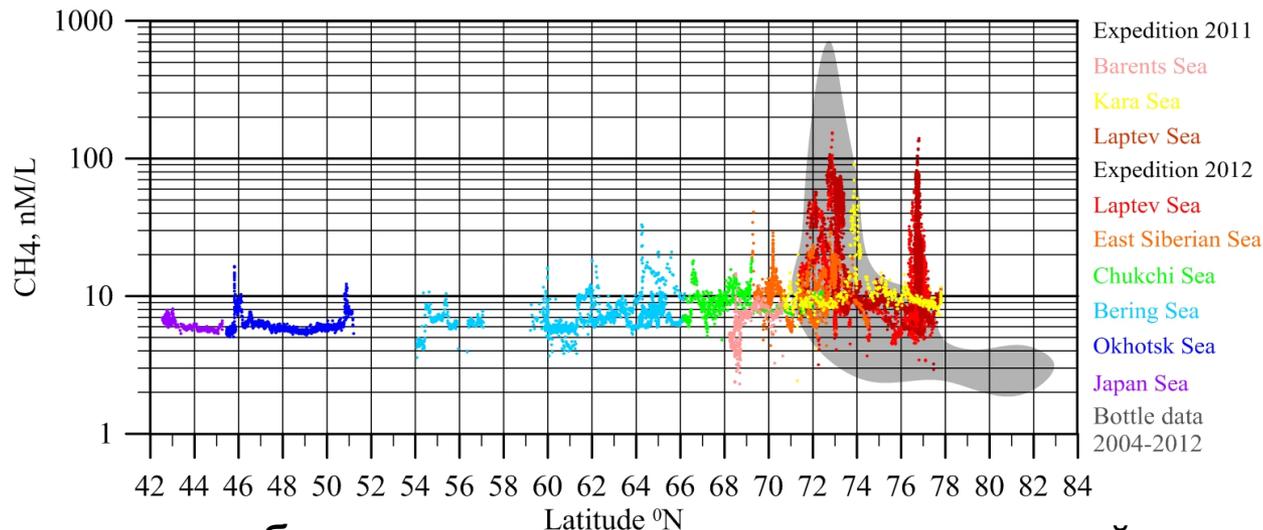
В морях Восточной Арктики зарегистрированы массивованные выбросы метана глубинного геологического происхождения



геофлюид



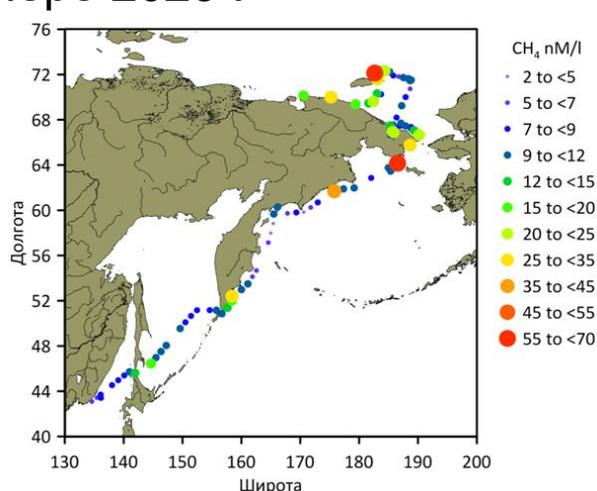
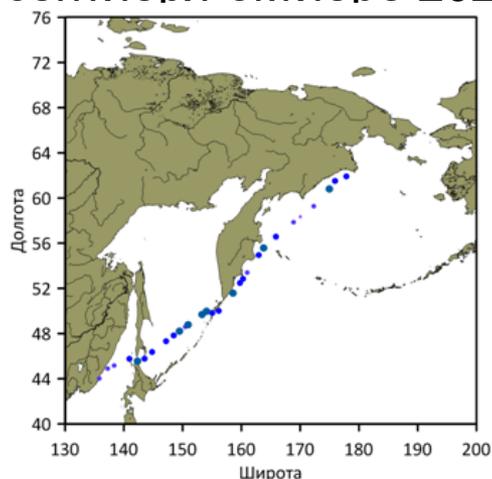
На арктическом шельфе РФ документированы самые высокие в Северном полушарии концентрации растворенного метана в поверхностном слое воды.



На рисунке объединены результаты измерений растворенного метана в поверхностной воде морей Российской Арктики и ДВ морей выполненные авторским коллективом с помощью автоматической парофазной динамической системы (более 15,000 измерений) и более, чем на 1,400 океанологических станций за период 2000-2015гг (Shakhova et al., Geosciences, 2019: на основе Космач и др., ДАН, 2015). **В настоящее время выполнено около 10 млн измерений с помощью новой технологии – на два порядка больше чем во всем Мировом океане (к публикации готовится ряд статей)**

Новые данные по синоптической изменчивости морских источников метана в Тихоокеанском секторе Арктики (ТСА) и Дальневосточных (ДВ) морях

Представлены результаты дискретных измерений концентрации растворенного CH_4 в поверхностном слое воды (глубина 2,5 м.), на основе посуточного отбора проб воды с парофазной экстракцией и аналитическим окончанием на газовом хроматографе по маршруту следования НИС «Академик Опарин» в конце сентября-октябре 2023г. и в ноябре 2023 .

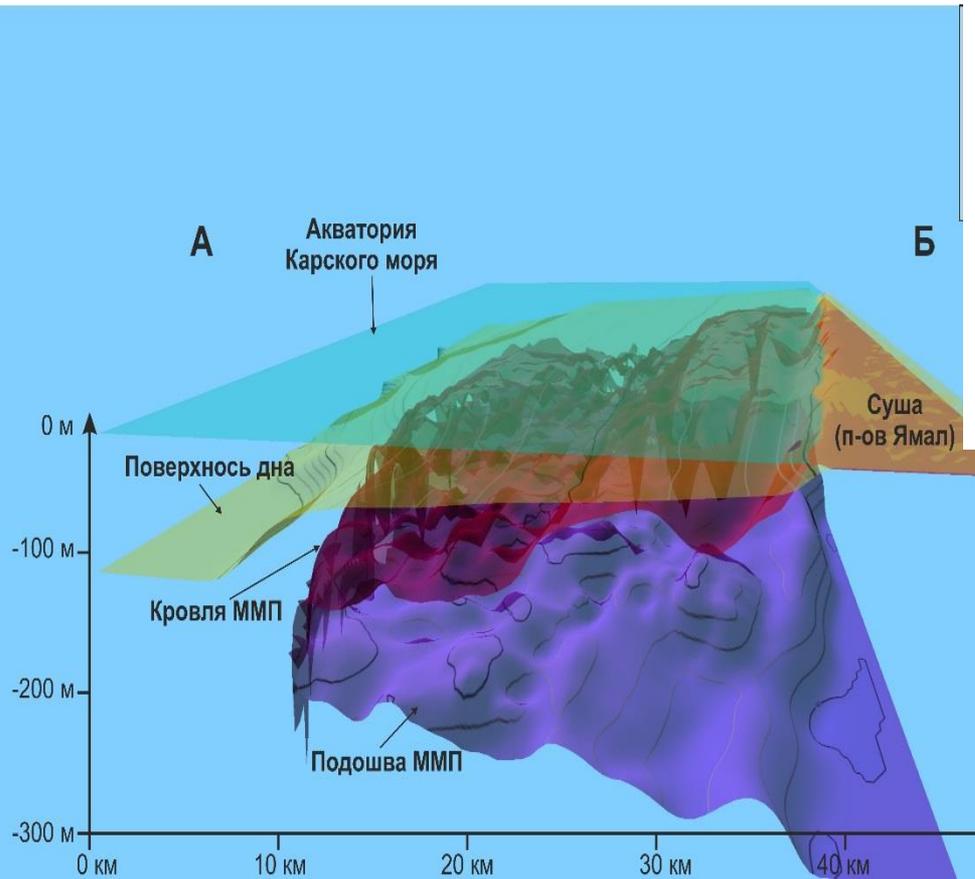
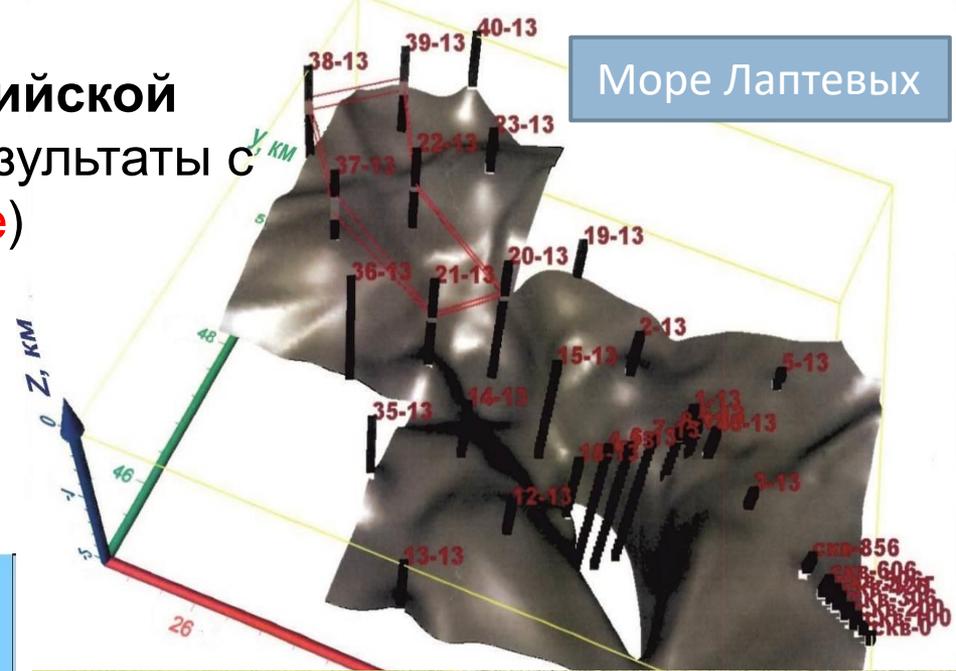


Карта-схема распределения растворенного CH_4 в поверхностном слое ДВ морей по маршруту следования НИС «Академик Опарин» в сентябре-октябре (слева), и ноябре (справа) 2023 года: демонстрирует многократное увеличение концентраций CH_4 после осеннего переворота вод (статья в подготовке)

Количественная оценка роли акватории ДВ морей и ТСА в атмосферном балансе CH_4 (и CO_2) планируется на научно-технологической платформе СахалинТЕСН

Примеры опасных явлений в Российской Арктике на шельфе (совместные результаты с А. Кошурниковым, **неопубликованные) и на суше –ямальские кратеры...**

Море Лаптевых



© Vasily Bogdanov / The Siberian Times

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТЭК В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ



результаты полевых исследований

Основа подхода – создание репрезентативной прогностической математической модели тепломассопереноса, основанной на знании процессов, результатах полевых работ и постоянного мониторинга параметров среды.

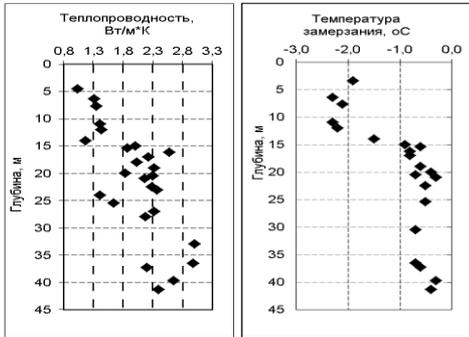
Тектоническая модель

Геологическая модель

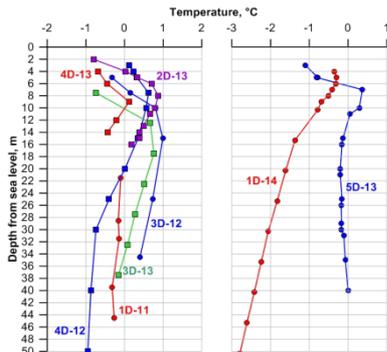
Климатическая модель

Инженерная модель

Математическая модель

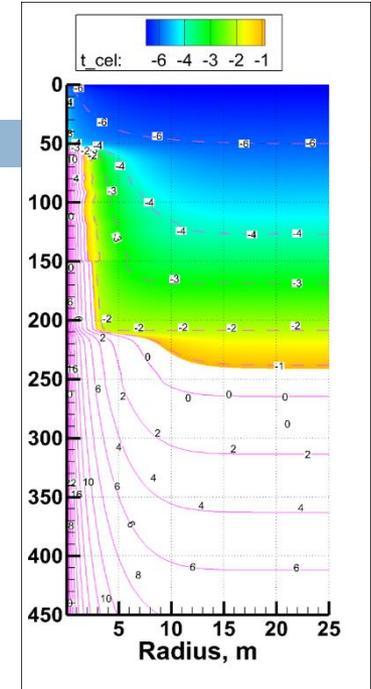


результаты лабораторных исследований

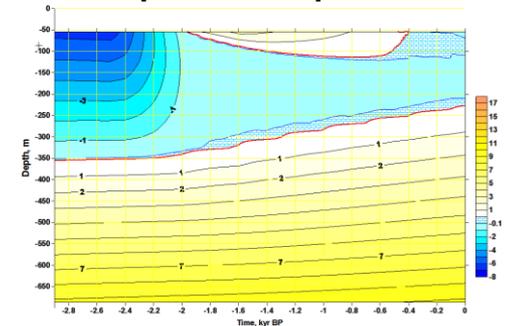


мониторинг инженерно-геологических параметров

Тесное многолетнее сотрудничество геологов, геокриологов, геофизиков, математиков, климатологов, физиков, химиков и многих других специалистов.



математическое моделирование взаимодействия скважины с мерзлыми породами



создание региональных математических моделей изменения мерзлоты при изменении климата на суше и на шельфе

Сопоставление результатов бурения и моделирования



**по моделированию
кровля ММП на глубине
70-85 м**

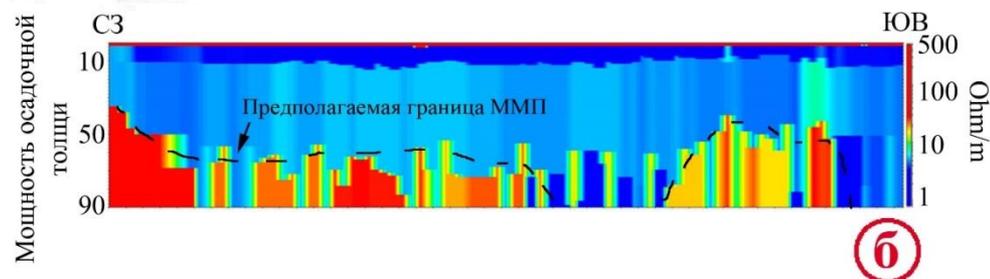
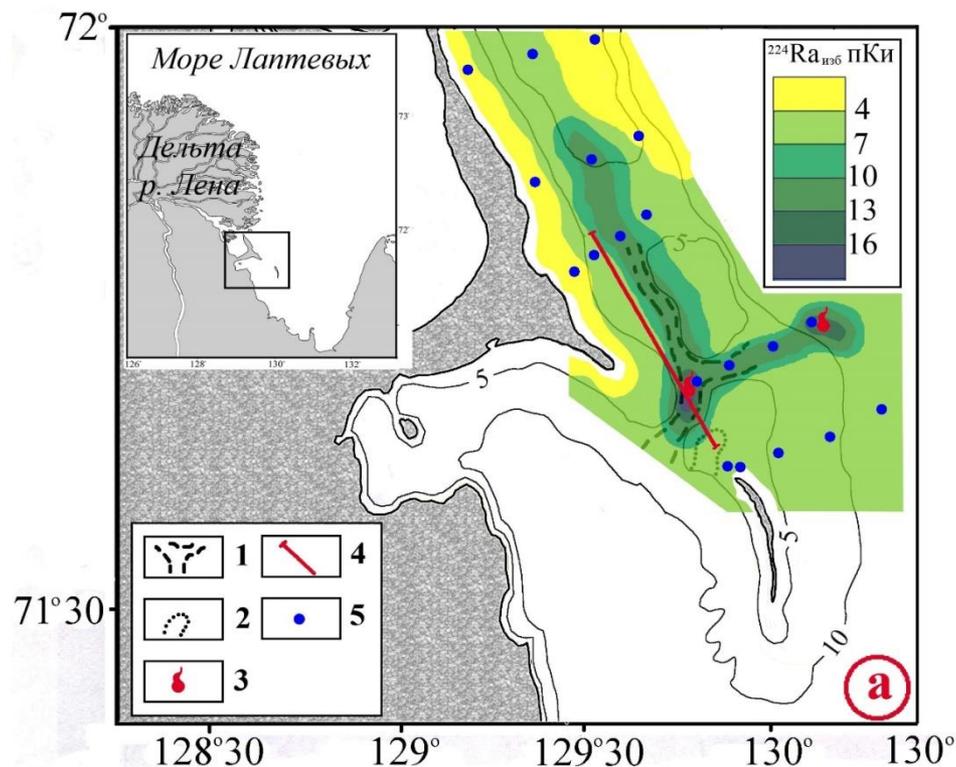
**кровля ММП по термометрии
на глубине 85-90 м**

**кровля ММП по
термометрии
на глубине 90 м**

**«Изучение эволюции криолитозоны шельфа возможно только на основе математического моделирования в сопоставлении с фактическими данными для современности»
[Тумской, Типенко, Шахова, Семилетов, 2024 (в печати)]**

Новое направление

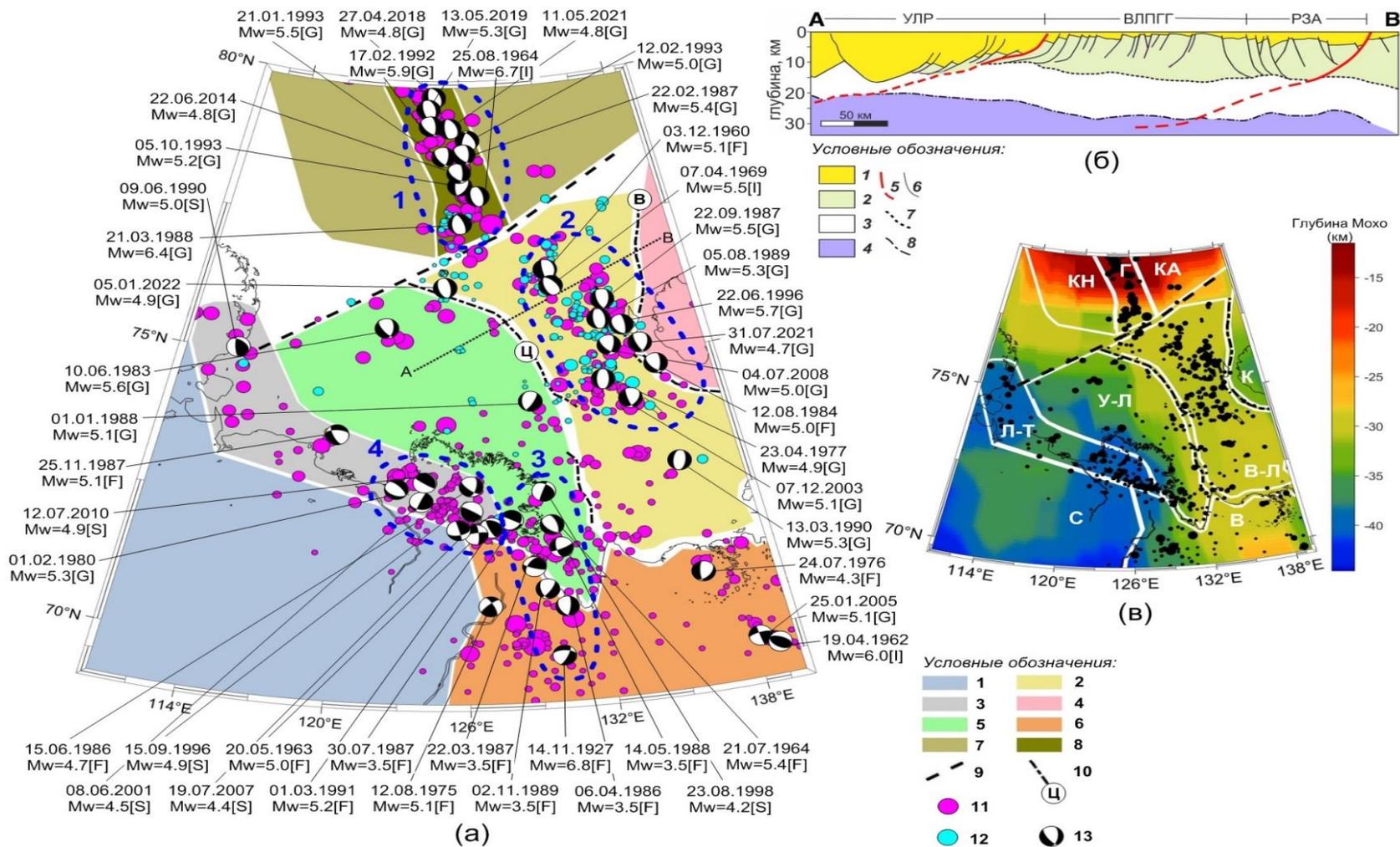
Впервые на Сибирском арктическом шельфе документирована разгрузка грунтовых вод, которые могут ускорить деградацию ПМ и дестабилизацию гидратов



Распределение индикатора выхода грунтовых вод – изотопов ^{224}Ra в исследуемом районе (верхняя панель), и положение кровли подводной мезлоты выполненное на основе электромагнитного зондирования (Кошурников и др., ДАН, 2016) по разрезу обозначенному на верхней панели в виде красной линии. (Charkin et al., C43-0792, доклад представлен на AGU Fall Meeting, San-Francisco, CA, Dec. 17, 2015; *Cryosphere*, 2017)

Новое направление

Выявление взаимосвязи между массивными выбросами метана из морских осадков с сейсмотектоническими процессами (Крылов и др., ДАН, 2023)



НОВЫЕ МЕТОДЫ– РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ УНИКАЛЬНЫХ АППАРАТУРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

погружной магнитометр



Количество измеряемых компонент	3
Тип датчиков	магнито-модуляционный
Рабочий диапазон индукции постоянного магнитного поля, мкТл	±100
Предел основной погрешности коэффициента передачи, не более	3%
Погрешность ортогонализации, угловые градусы, не более	0,1
Диапазон рабочих температур, °С	-20 ÷ +70
Степень защиты	IP68 (100 м)
Масса, кг, не более	2,5

подводный скважинный TSP логгер с гидро-акустическим трансивером



подводная часть (логгер и передатчик) **погружная часть (приёмник)**

Уникальный измерительный комплекс оборудования для проведения режимных измерений температуры (Т), солёности (S) и давления (Р) в скважинах на арктическом шельфе и суше.

Устанавливается в скважине под водой, передача данных происходит без его подъема на поверхность.

Защищен от ледовых воздействий.

температурные логгеры



Емкость памяти данных, Гбайт, не менее	8
Тип памяти данных	Industrial microSD
Степень защиты	IP65, IP67
Температурный диапазон, °С	-40 ... +60
Габаритные размеры, мм	290x45x40

В 2024-2025гг особое внимание будет уделено развитию

1. Климатического и экологического мониторинга в ДВ морях и Северного морского пути на мировом уровне – в соответствии с международными стандартами
2. Оценке влияния транспорта и трансформации наземного вещества в сравнении с антропогенным загрязнением, что необходимо для оценки природного экспорта ТМ и выявления их влияния на всех трофических цепочках на акватории СМП и ДВ морей, с фокусом на Охотском море-крупнейшем внутреннем море РФ
3. Оценки современного статуса экосистемы Охотского моря и его потенциала в поглощении углекислого газа
4. Разработке методологии включения акватории Охотского моря-внутреннего моря России, и акватории СМП в региональные балансы и кадастры парниковых газов
5. Разработке системы методов дистанционного зондирования (спутникового наблюдения), оценки и прогнозирования углеродного баланса акваторий нового поколения (стандарт национального уровня) и валидации ее для применения на международном уровне

Выводы

Прогрессирующая деградация подводной мерзлоты с образованием бугров пучения (пинго) и покмарков (кратеров) обусловленных массивным выбросом пузырькового метана являются: 1) неучтенным климатическим фактором, и 2) характеризуется повышенным риском при развитии нефтегазовой индустрии и инфраструктуры СМП, включая установку буровых платформ, ядерных плавучих установок.

Эрозия берегового ледового комплекса и возрастающий речной сток являются ключевыми природными факторами, которые определяют осадконакопление, динамику потоков CO₂, и в целом - биогеохимический режим арктического и субарктического шельфа

Шельф морей Восточной Арктики- самый широкий и мелководный в Мировом океане, является источником коррозионных вод, перенасыщенных CO₂ и CH₄, в глубоководный бассейн Северного Ледовитого океана.

Для количественной оценки стоков и источников основных парниковых газов на обширном арктическом (СМП) и субарктическом (ДВ моря) шельфе РФ необходимо масштабирование представленных подходов и результатов в рамках существующих федеральных программ



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ