

Л.И.Лобковский¹, А.А.Баранов², М.М.Рамазанов³,

(1) Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН, Москва;

(2) Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва;

(3) Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики РАН, Махачкала, Дагестан, Россия

Сейсмогенно-триггерный механизм резкого потепления климата в Арктике и ускорения движения ледников в Антарктике, основанный на деформационных волнах от сильнейших землетрясений в зонах субдукции

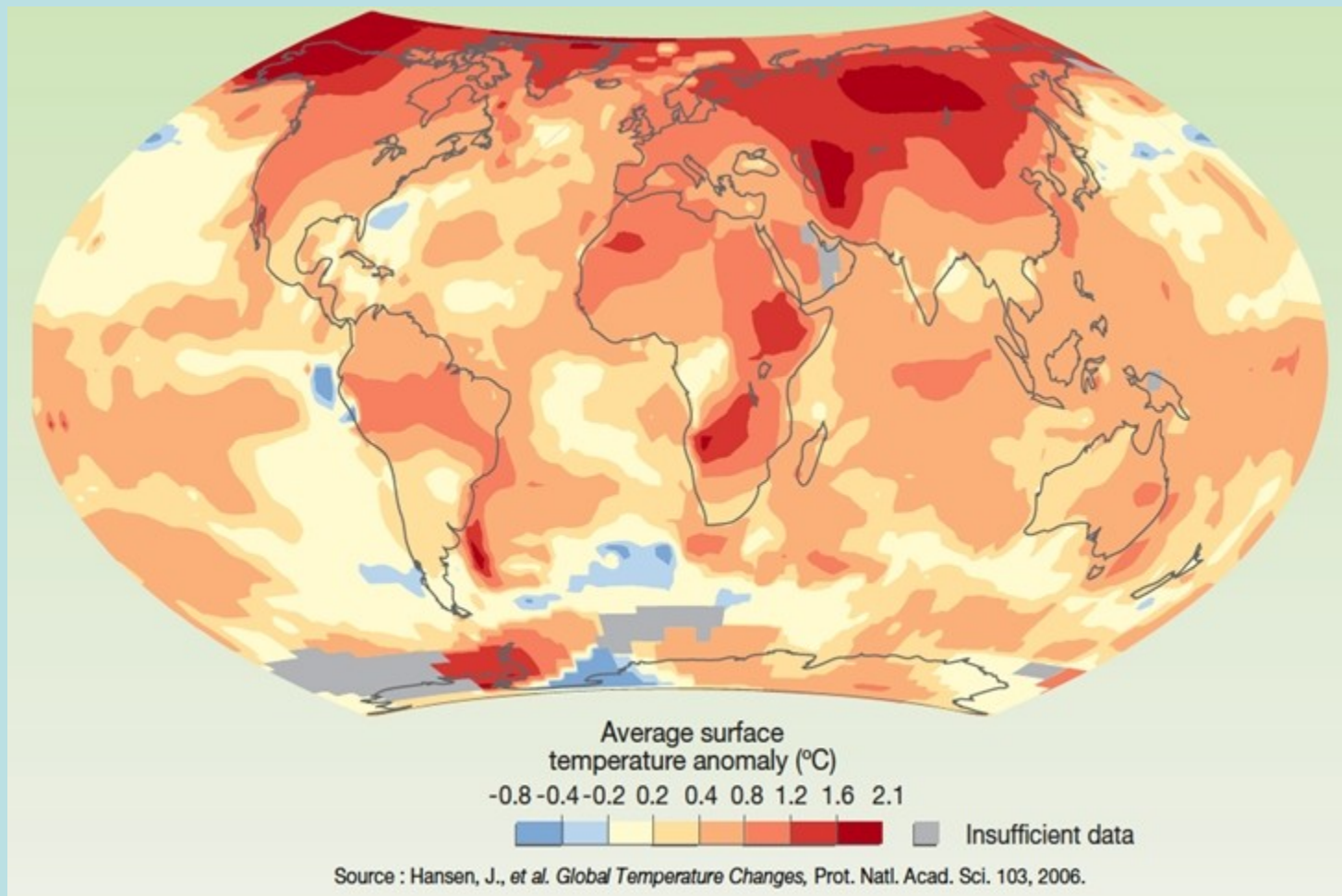


**III Всероссийская научная конференция с международным участием
«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»
посвященная памяти Соловьева А.А.**

25-26 октября 2023 г., Москва

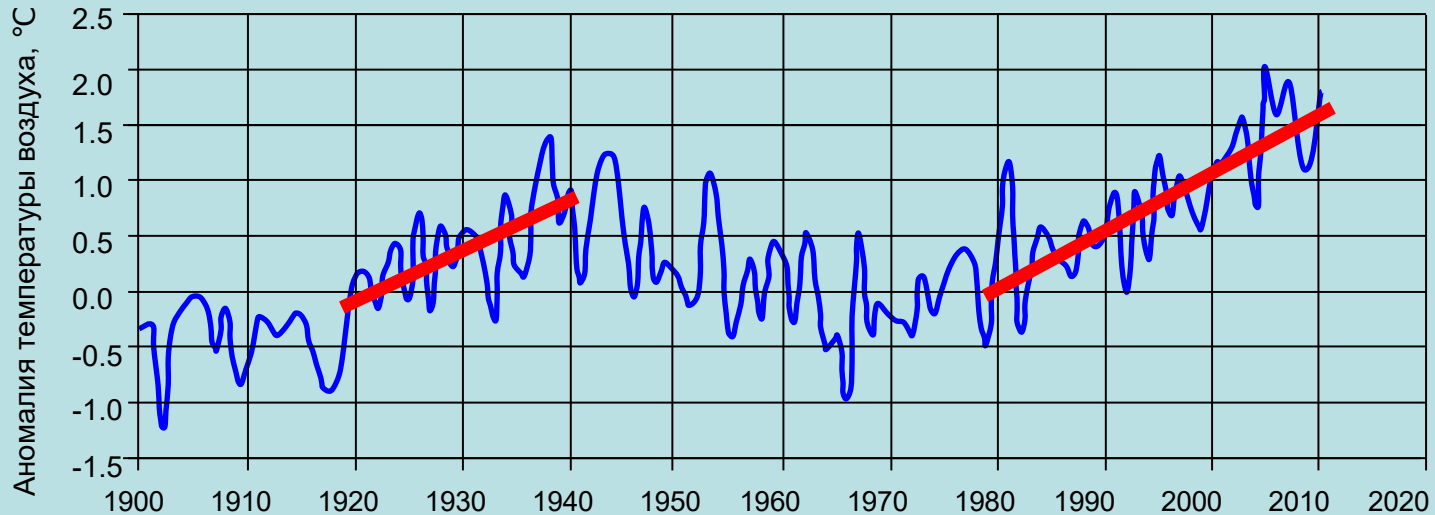
Потепление климата на Земле

Среднегодовые температуры в период 2001-2005 гг. по сравнению с 1951-1980 гг.

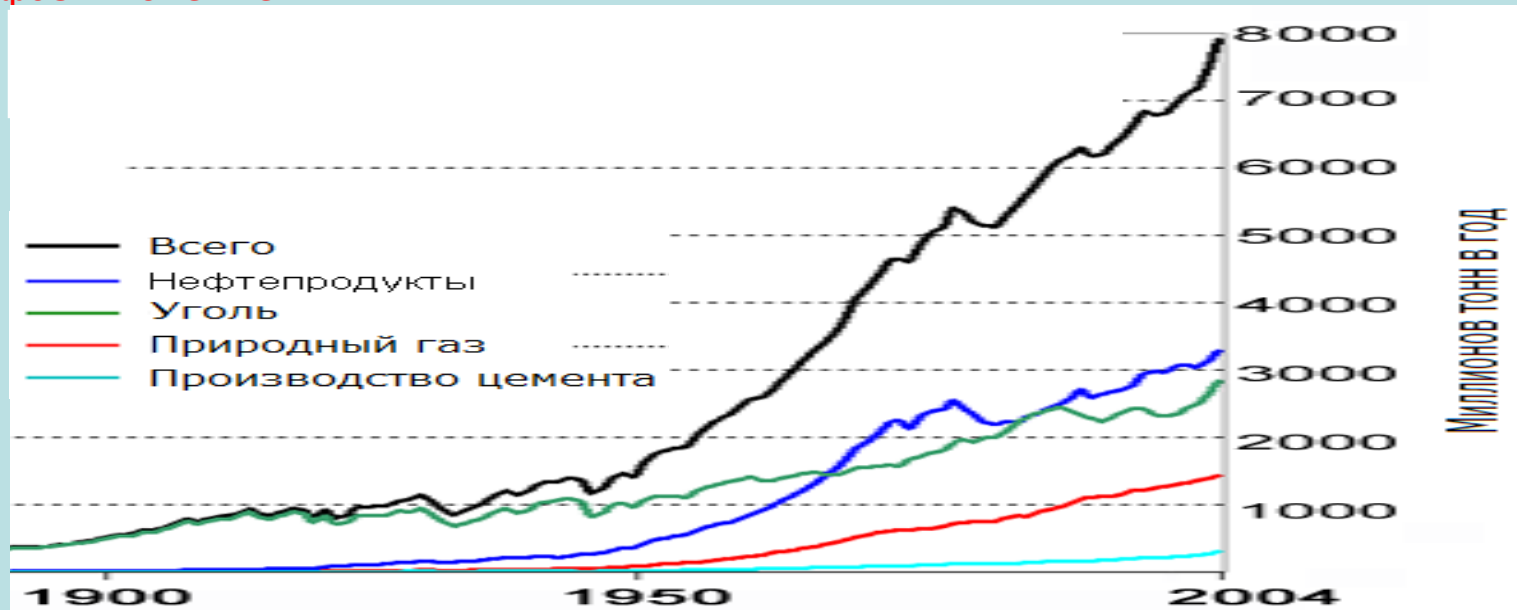


- Температура арктических воздушных масс в последние десятилетия повышается практически в два раза быстрее, чем средняя температура на планете.
- Это связано с пониженной отражательной способностью поверхности ввиду сокращения площади снежного и ледяного покровов, особенно в акватории СЛО.
- Рекорд температуры в Арктике был зафиксирован в 2007 г.

Две фазы резкого потепления в Арктике



Изменения температуры воздуха в Арктике с начала XX в. по данным Арктического и антарктического научно-исследовательского института. **Красными жирными линиями показаны фазы потепления**



Дегградация подводной мерзлоты и выбросы метана

Восточно-Сибирский шельф содержит наиболее мелководные (и нестабильные) залежи газогидратов



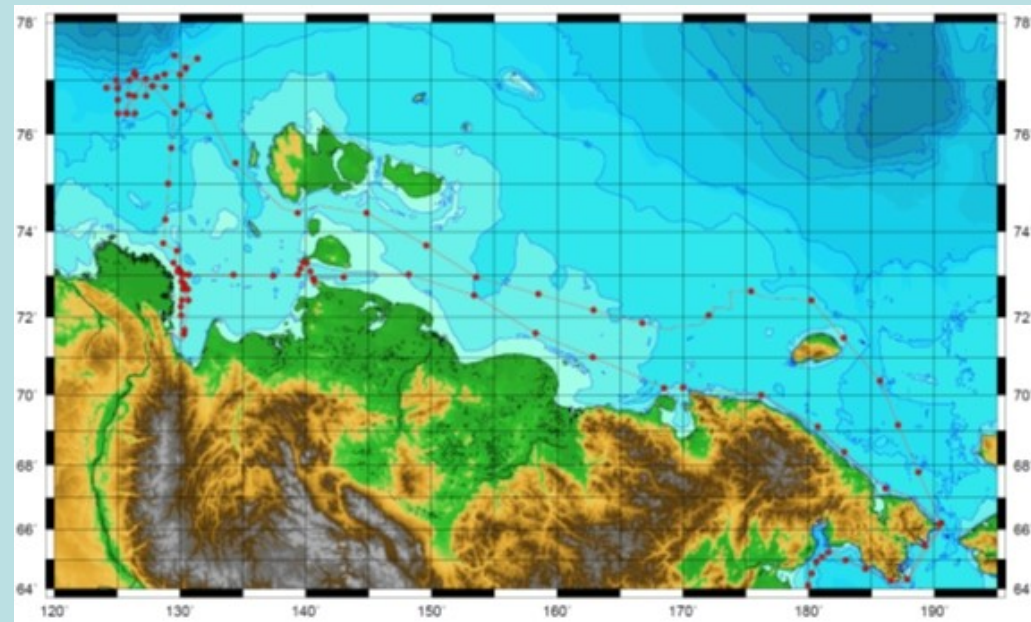
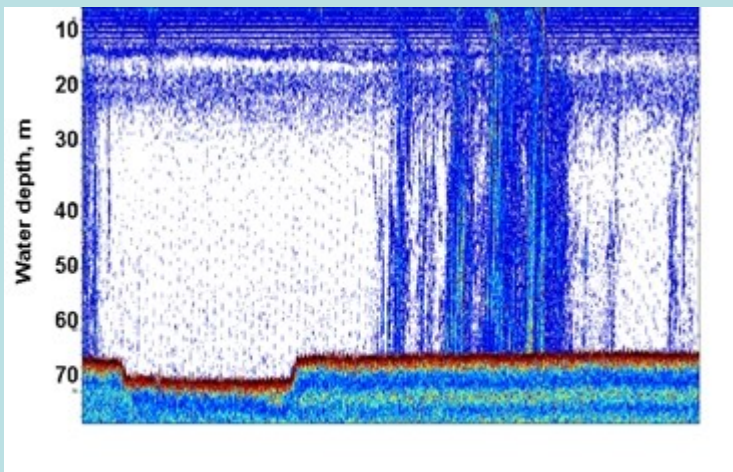
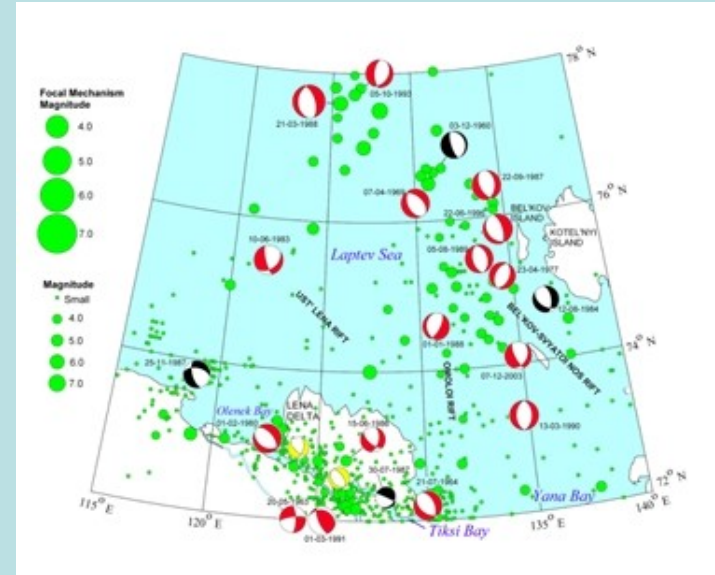
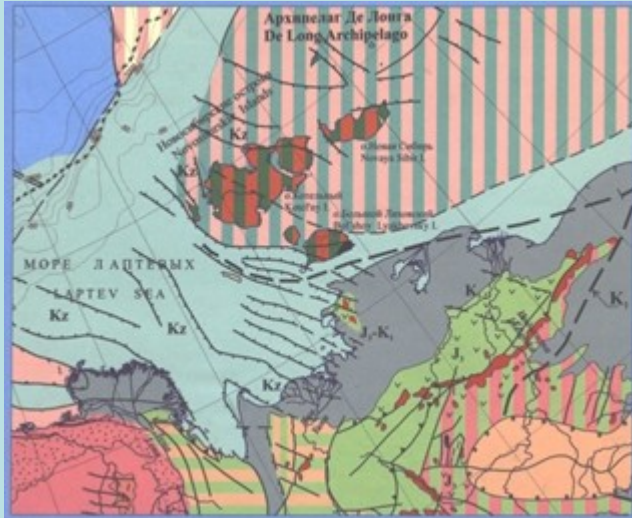
Прогнозные месторождения газогидратов



Акватории с глубиной менее 50 м

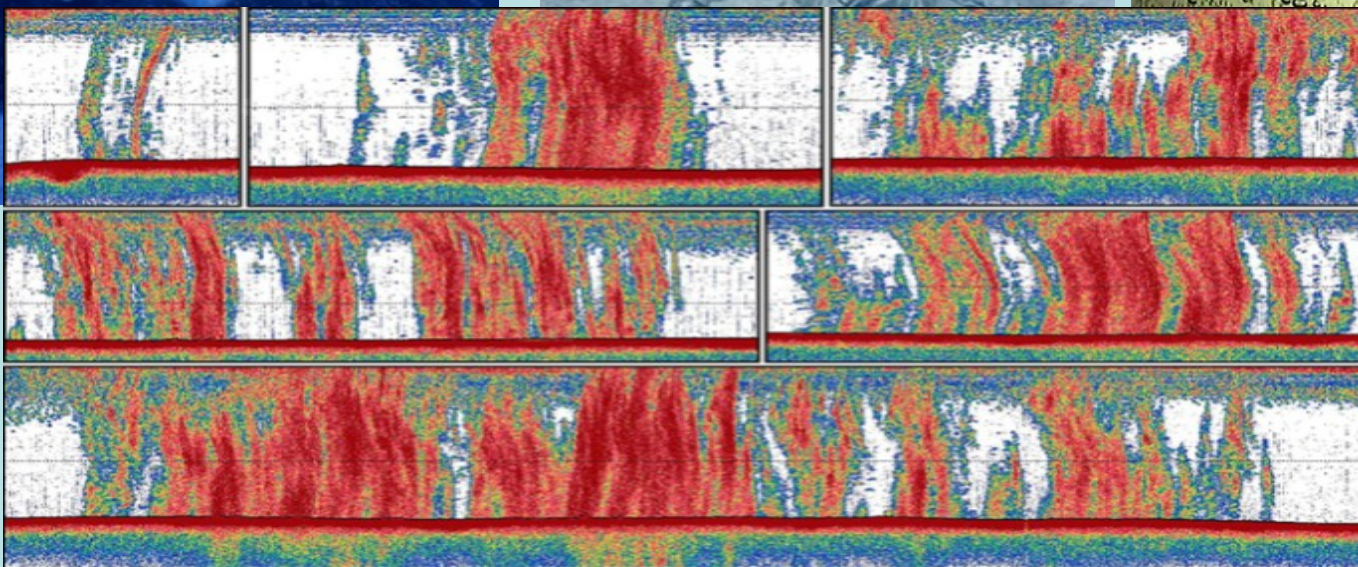
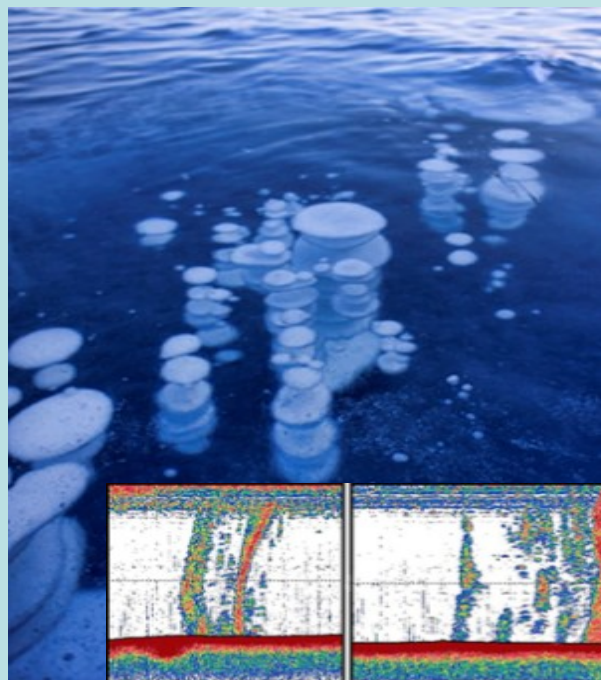
- **В Арктике большое количество метана содержится в форме мерзлых газовых гидратов.** Метан является высокоактивным парниковым газом. В форме гидратов он обнаруживается в больших количествах в морских осадках и многолетнемерзлых породах. По оценкам ряда специалистов в газовых гидратах содержится больше углерода, чем во всех известных месторождениях угля, нефти и природного газа вместе взятых
- **Большая часть гидратов локализуется на континентальном шельфе.** Особое значение имеет шельф Арктики, где газогидраты находятся внутри толщи многолетнемерзлых пород. Поскольку в Арктике газогидраты ассоциируются с вечной мерзлотой, протаивание последней может приводить к нарушению их устойчивости
- **Выбросы метана могут происходить либо вследствие протаивания многолетнемерзлых пород, либо из-за механического разрушения метастабильных газогидратов, вызванного геодинамическими факторами.** Поскольку основная часть акватории арктического шельфа имеет малые глубины, значительное количество освобожденного метана переходит в атмосферу в неокисленном состоянии (не будучи преобразованным в CO_2). С точки зрения парникового эффекта, метан приблизительно в 25 раз активнее по сравнению с CO_2
- **При нарушении устойчивости гидратов** освобожденный метан сильно увеличивает свой объем, приводя к значительному повышению давления, в результате чего происходят резкие выбросы (взрывы).
- **По оценкам самый широкий и мелководный Восточно-Сибирский шельф может содержать большой объем газогидратов.** В отдельных районах шельфа наблюдается интенсивная эмиссия метана в виде так называемых сипов.

Эндогенный механизм выброса метана за счет сейсмоактивных разломов в рифтовой зоне моря Лаптевых

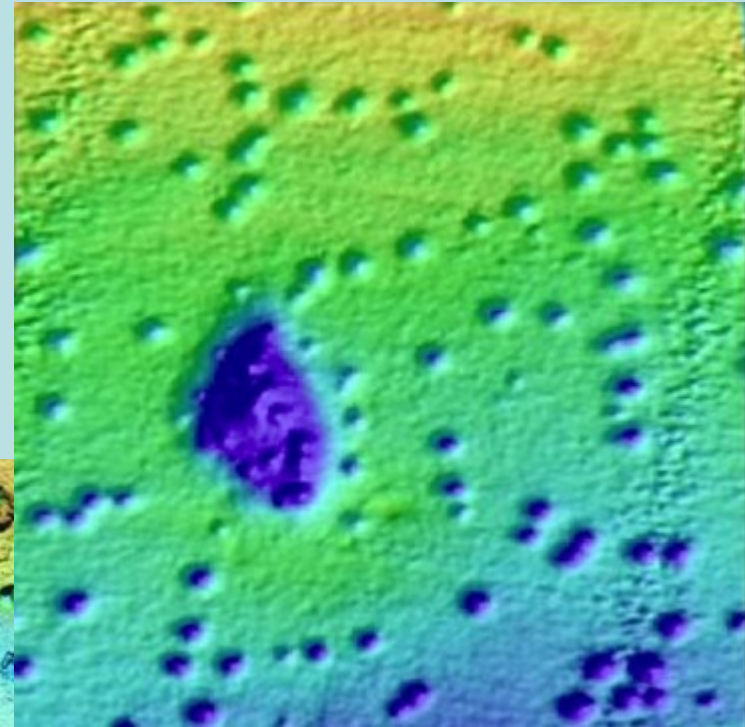
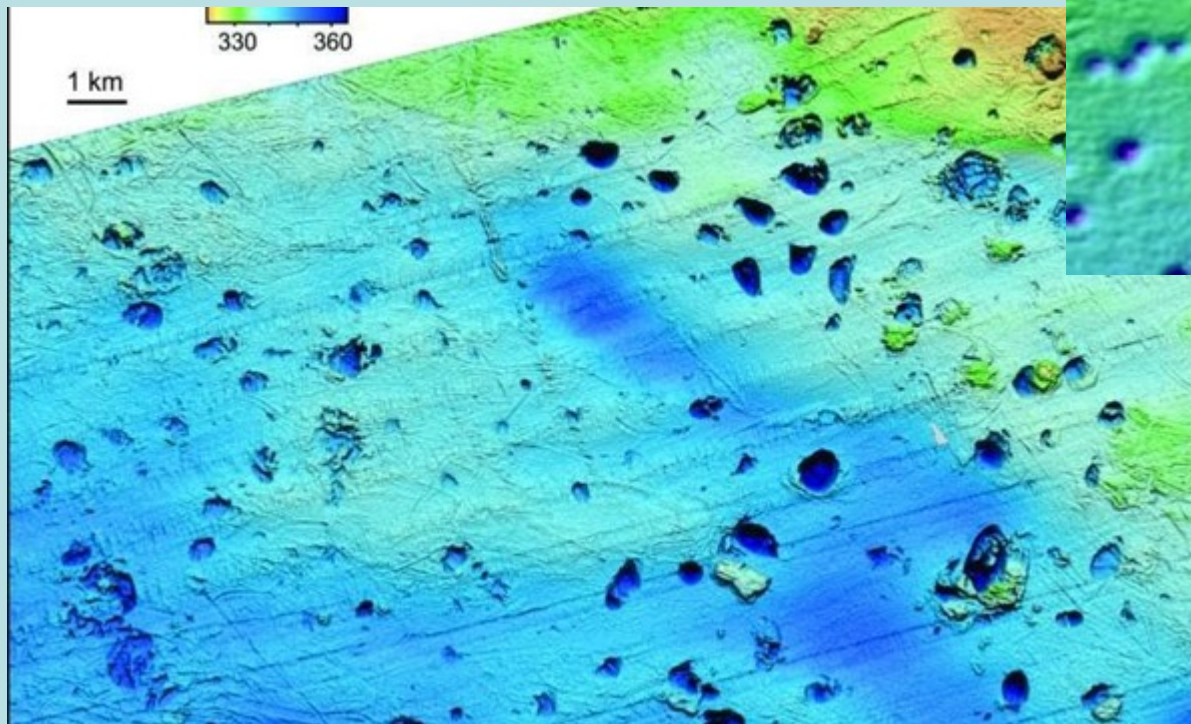


Выбросы метана из области шельфа Восточной Сибири

Пузырьковый перенос - основной механизм транспорта метана из донных отложений в водную толщу и атмосферу



Покмарки на дне Арктического шельфа



Остаточная воронка от предполагаемого выброса метана в районе Бованенковского месторождения на п-ове Ямал



Процессы деградации вечной мерзлоты и их проявленность в ландшафте



Нестабильность газогидратов и роль многолетнемерзлых пород

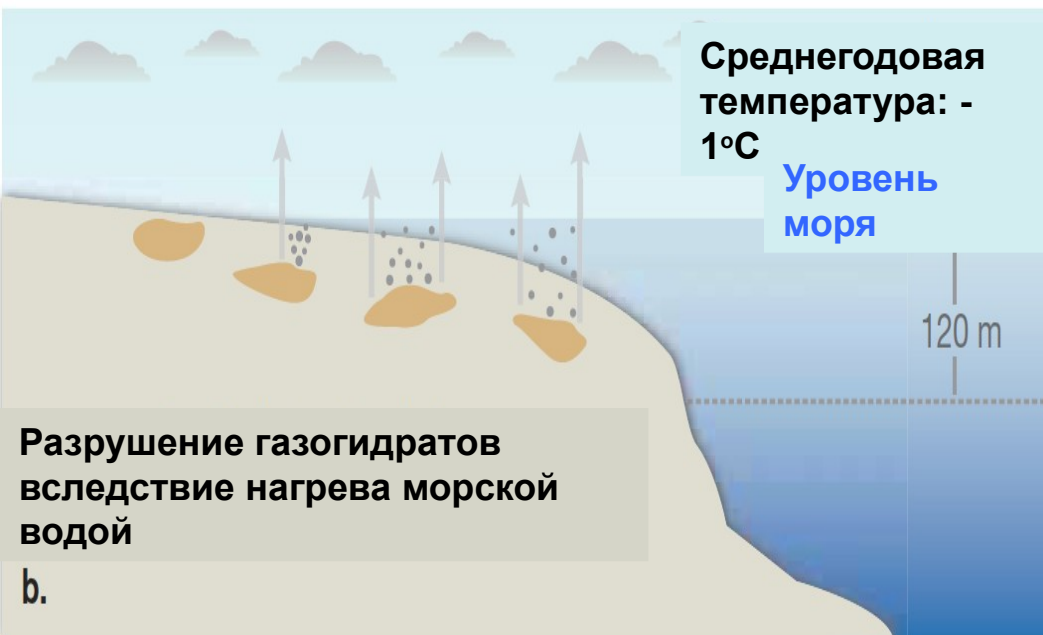
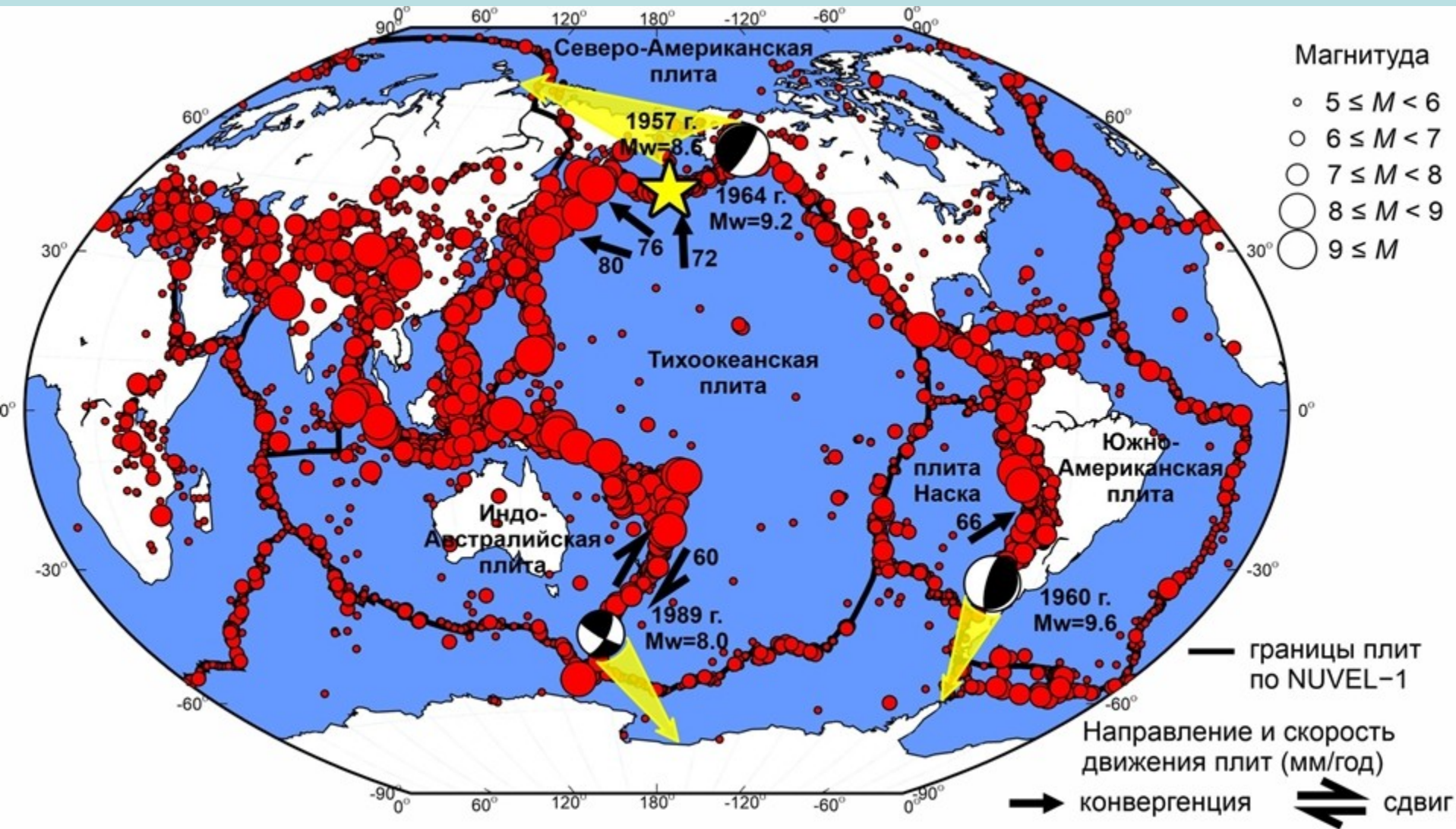


Иллюстрация показывает, как изменение уровня моря влияет на стабильность арктических газогидратов:

- а) холодный период – уровень моря понижен, дно шельфа выходит на поверхность, среднегодовая температура -17°C;
- б) теплый период – уровень моря повышен, шельф затоплен, среднегодовая температура воды -1°C

Процесс деградации подводной вечной мерзлоты в Арктике начался достаточно давно (7000-15000 лет назад), когда шельфовые территории были затоплены. При этом температура многолетнемерзлой толщи возросла на 12°C и более. По мере приближения мерзлоты к тепловому равновесию, ее температура приближается к температуре таяния, составляющей для солесодержащих пород чуть менее 0°C.

Распространение деформационных волн, вызванных сильнейшими землетрясениями, в Арктику и Антарктику

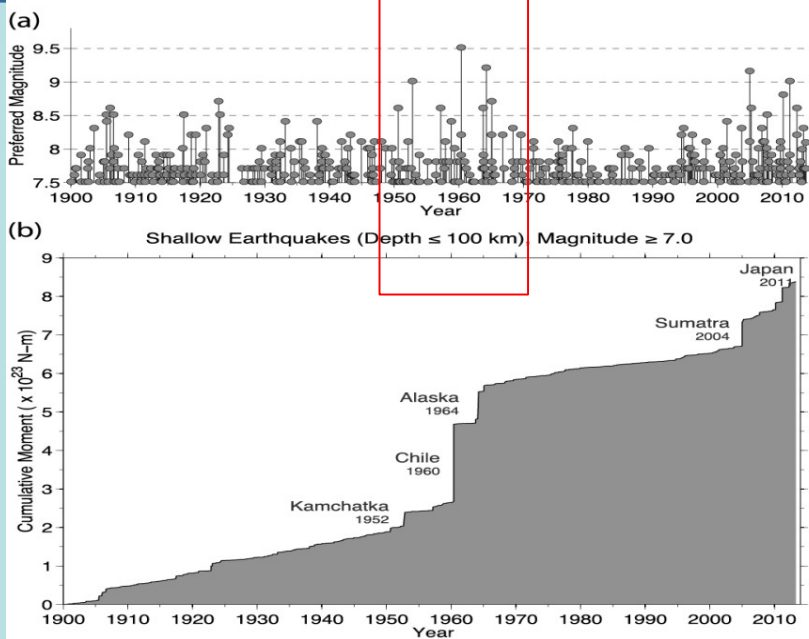
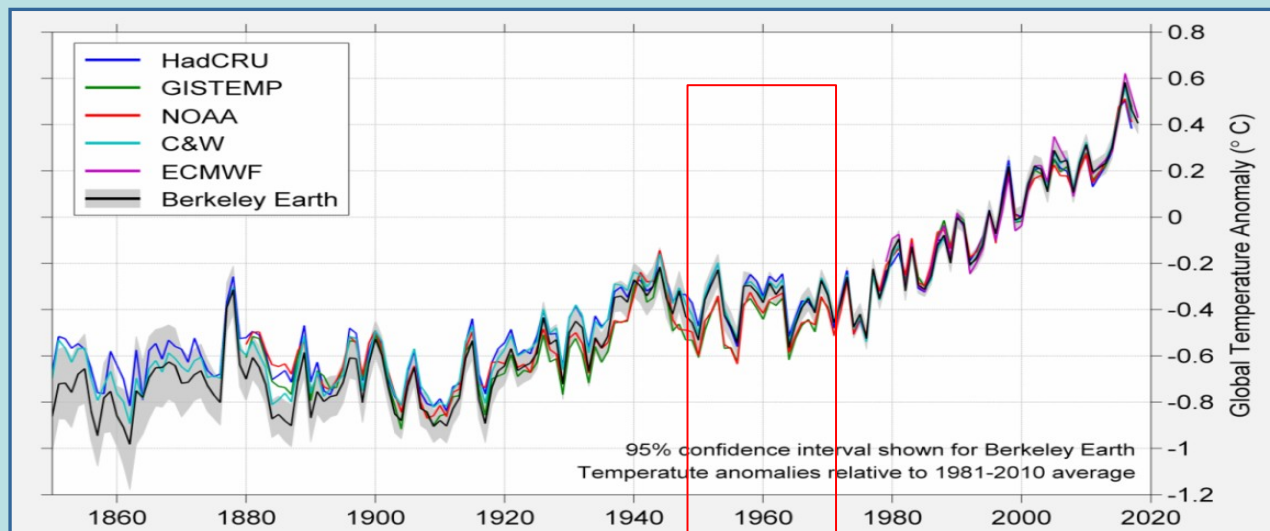


Global earthquake foci distribution in 1976–2020 based on GCMT catalog data, <https://www.globalcmt.org> (accessed on 16 April 2023).

Dziewonski, A.M.; Chou, T.-A.; Woodhouse, J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. Geophys. Res.* 1981, 86, 2825–2852.

Ekström, G.; Nettles, M.; Dziewonski, A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-Moment tensors for 13,017 earthquakes. *Phys. Earth Planet. Inter.* 2012, 200–201, 1–9.

Временной сдвиг на 20 лет между периодом максимального выделения сейсмической энергии Земли и резким началом потепления климата



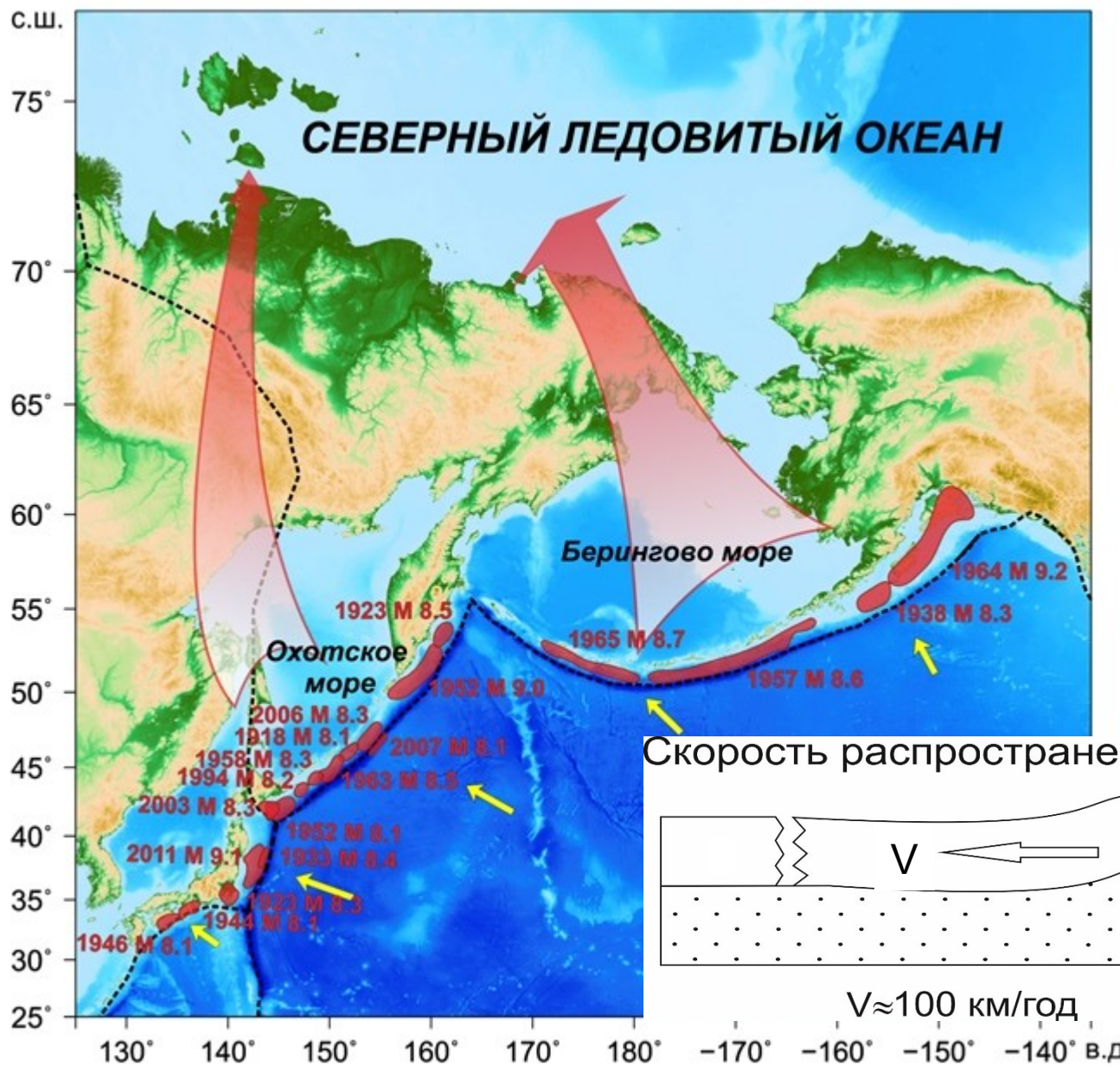
Сопоставление графиков изменения средней температуры на Земле выделения сейсмической энергии Земли

Climate at a Glance: Global Time Series: [Электронный ресурс] // NOAA National Centers for Environmental information.

URL: <https://www.ncei.noaa.gov/cag/>. (Дата обращения: 15.09.2022).

Lay T. The surge of great earthquakes from 2004 to 2014 // Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 409. P. 133–146.

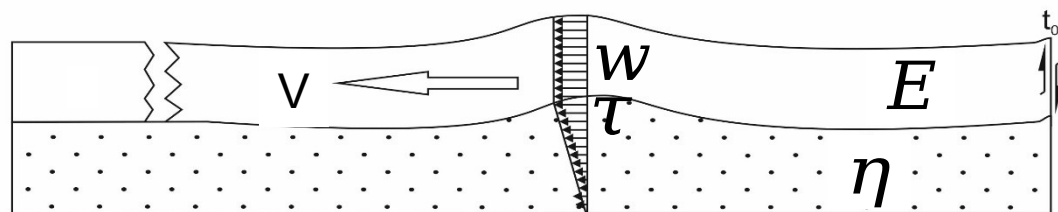
Распространение деформационных волн в Арктический регион, вызванных сильнейшими землетрясениями в Алеутской и Курило-Камчатской зонах субдукции



- горизонтальное смещение в литосфере

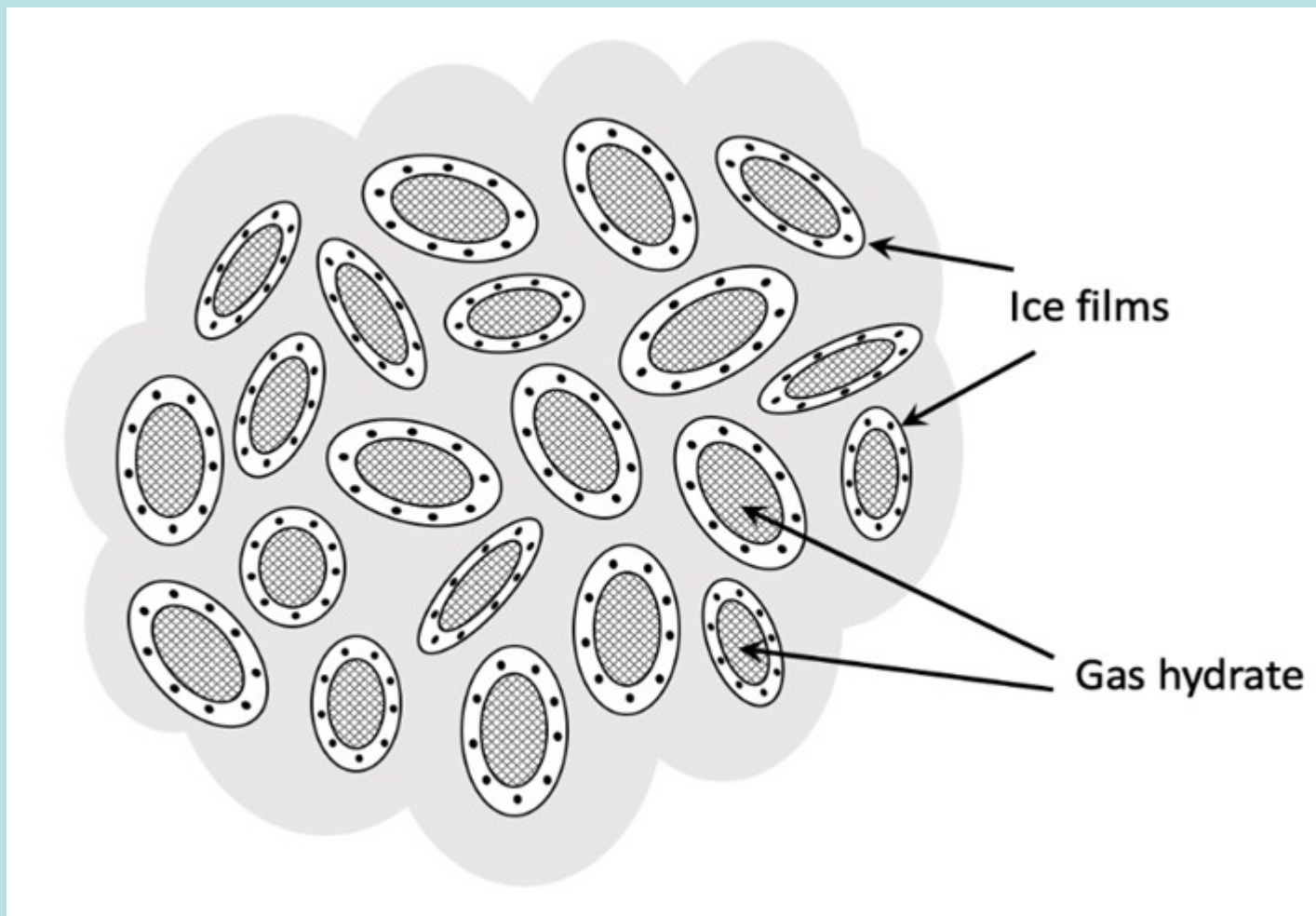
(Elsasser, 1968)

Скорость распространения волны возмущения



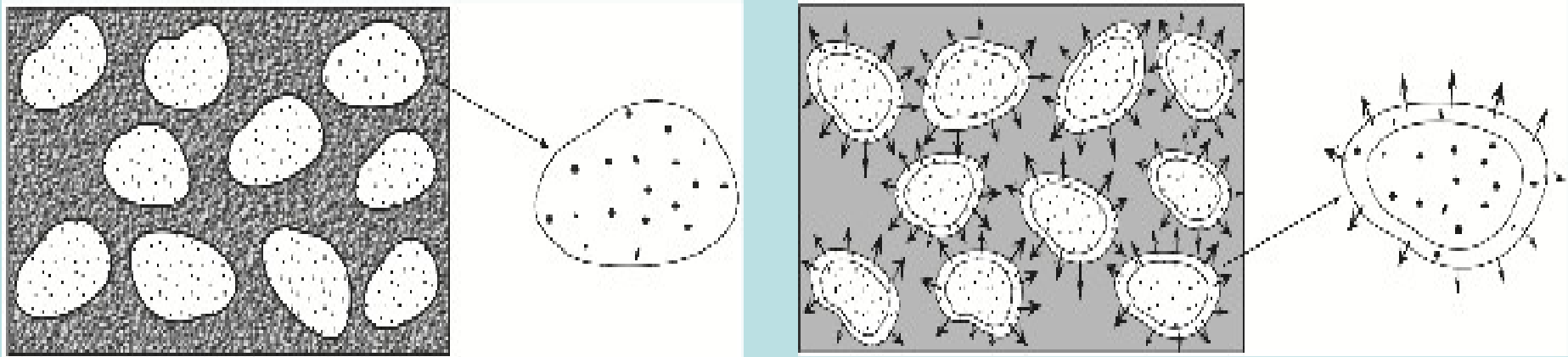
$V \approx 100$ км/год

Структура метастабильных газогидратов, допускающая эмиссию метана при ее разрушении деформационными волнами



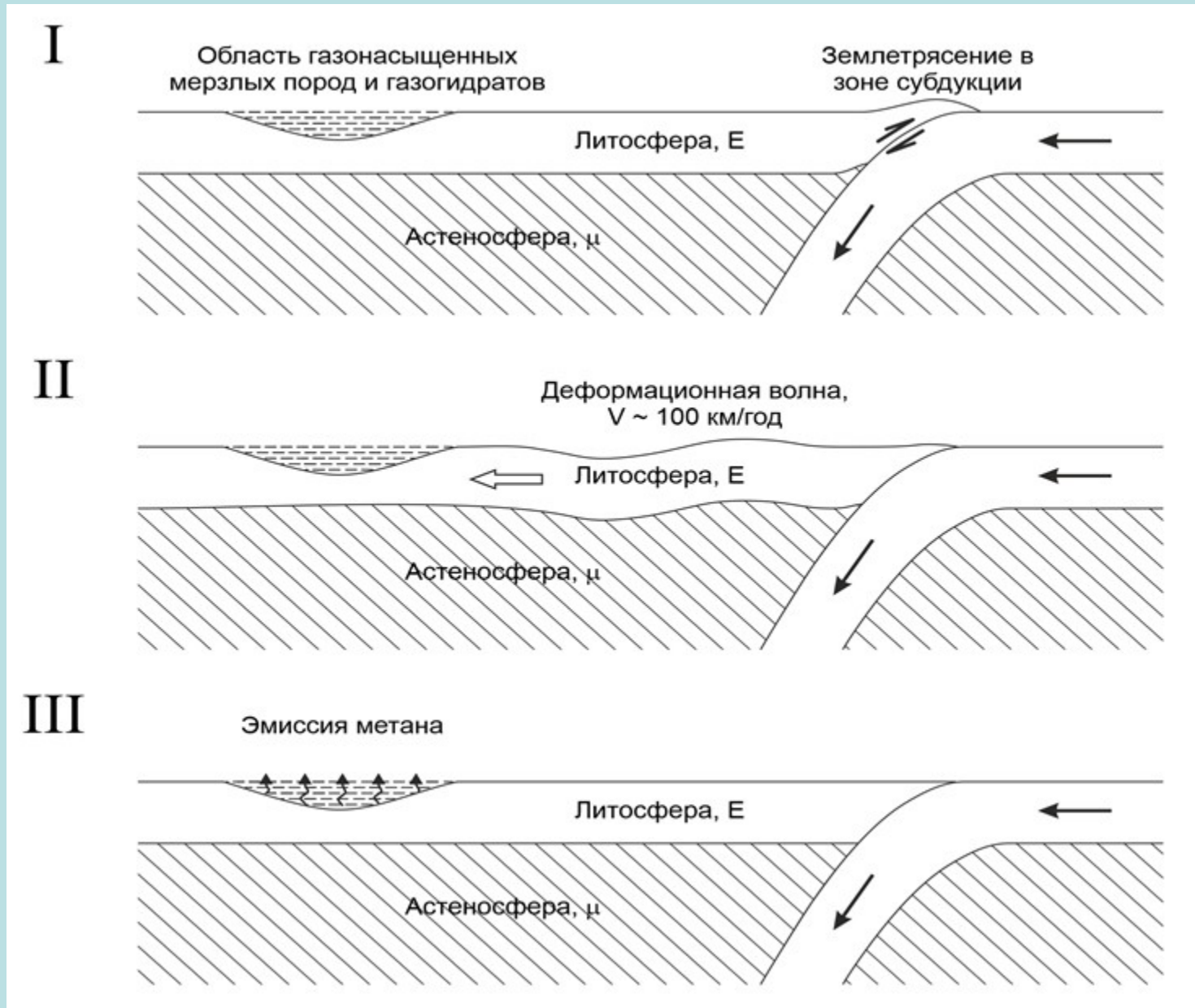
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО ЛЬДА И ГАЗОГИДРАТОВ

Г.И.Баренблатт*, член-корреспондент РАН Л.И.Лобковский**,
академик РАН Р. И. Нигматулин



Слева - структура метастабильных газогидратов с включениями, содержащими свободный газ, запертый ледяными пленками (Якушев, Чувиллин и др.); справа – разрушение ледяных пленок добавочными напряжениями, приводящее к освобождению метана и его последующей эмиссии

Сейсмогенно-триггерная схема возникновения деформационных волн в литосфере, приводящих к эмиссии метана в Арктике и Антарктиде (Лобковский, 2020)



ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В СИСТЕМЕ УПРУГАЯ ЛИТОСФЕРА-ВЯЗКАЯ АСТЕНОСФЕРА

Л. И. Лобковский^{a,b} , М. М. Рамазанов^c

a Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

b Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл., Россия

c Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики РАН, Махачкала, Дагестан, Россия

*E-mail: llobkovsky@ocean.ru **E-mail: mukamay-ipg@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2021 г. После доработки 06.05.2021 г. Принята к публикации 22.06.2021 г.

Рассмотрена задача о возникновении термомеханических волн в системе состоящей из двух горизонтальных слоев с реологиями линейно упругой среды для верхнего слоя (литосфера) и вязкой жидкости для нижнего (астеносфера) с учетом фазового перехода на их общей границе. Найдено точное решение задачи и изучены его свойства в зависимости от параметров. Показано, что при характерных значениях физических параметров литосферы и астеносферы существуют решения в виде умеренно затухающих деформационных тектонических волн, дана геофизическая интерпретация полученных результатов.

Научные исследования в Арктике

ISSN 1622-8522X-6994-2020-3-40-72
УДК 551.24

ВОЗМОЖНЫЙ СЕЙСМОГЕННО-ТРИГГЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ РЕЗКОЙ АКТИВИЗАЦИИ ЭМИССИИ МЕТАНА И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

Л. И. Лобковский

ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 8 июня 2020 г.

Предлагается сейсмогенно-триггерный механизм возникновения фаз резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике как следствие сильных механических возмущений краевой области арктической литосферы, вызванных сильнейшими землетрясениями в Алеутской зоне субдукции, переноси этих возмущений в область арктического шельфа и прилегающей суши и триггерного эффекта высвобождения метана из многолетнемерзлых осадочных пород и метастабильных газогидратов с последующими выбросами парникового газа в атмосферу.

Ключевые слова: активизация эмиссии метана, резкое потепление климата, Арктика, сильнейшие землетрясения, Алеутская зона субдукции, тектонические волны, триггерный механизм, метастабильные газогидраты, многолетнемерзлые породы, фильтрация газа.

Введение

Проблема глобального потепления климата на Земле в последнее время выдвинулась на передний план среди общих проблем цивилизации, поскольку, по мнению большинства специалистов, занимающихся вопросами ее устойчивого развития, дальнейшее потепление климата с наблюдаемым в последние 40 лет ускоренным трендом повышения температуры ставит вопрос о выживаемости человечества и возможности его адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды, вызванным таким потеплением. Относительно причин глобального потепления климата существует громадная литература, причем число публикаций по этой теме в последнее время нарастает в геометрической прогрессии. Основной версией объяснения данного феномена считается антропогенный фактор возникновения парникового эффекта, обусловленного повышением выбросами углекислого

газа в атмосферу вследствие ускоренного развития мировой индустрии, в частности нефтегазовой отрасли.

Существует довольно много работ, в которых предлагаются математические модели, показывающие влияние выбросов углекислого газа на потепление климата. Однако, как правило, остается за кадром очень серьезный и интригующий вопрос: какова причина на первый взгляд совершенно внезапного наступления фаз резкого потепления климата на Земле, особенно в арктическом регионе?

На рис. 1 показана известная кривая изменения температуры для Арктики в XX и XXI вв., на которой ясно видны две фазы достаточно резкого подъема усредненной температуры на фоне ее многолетних колебаний: первая фаза заметного подъема приходится на двадцатилетний период 1920—1940 гг., а вторая фаза потепления длится уже 40 лет, начавшись примерно в 1980 г., и продолжается в наши дни. С позиций промышленно-антропогенной теории потепления климата, вообще говоря, необходимо по-

© Лобковский Л. И., 2020



Communication

Seismogenic-Trigging Mechanism of Gas Emission Activizations on the Arctic Shelf and Associated Phases of Abrupt Warming

Leopold Lobkovsky^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), 141701 Dolgoprudny, Russia

² P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 117997 Moscow, Russia; lobkovsky@ocean.ru

Received: 27 July 2020; Accepted: 22 October 2020; Published: date

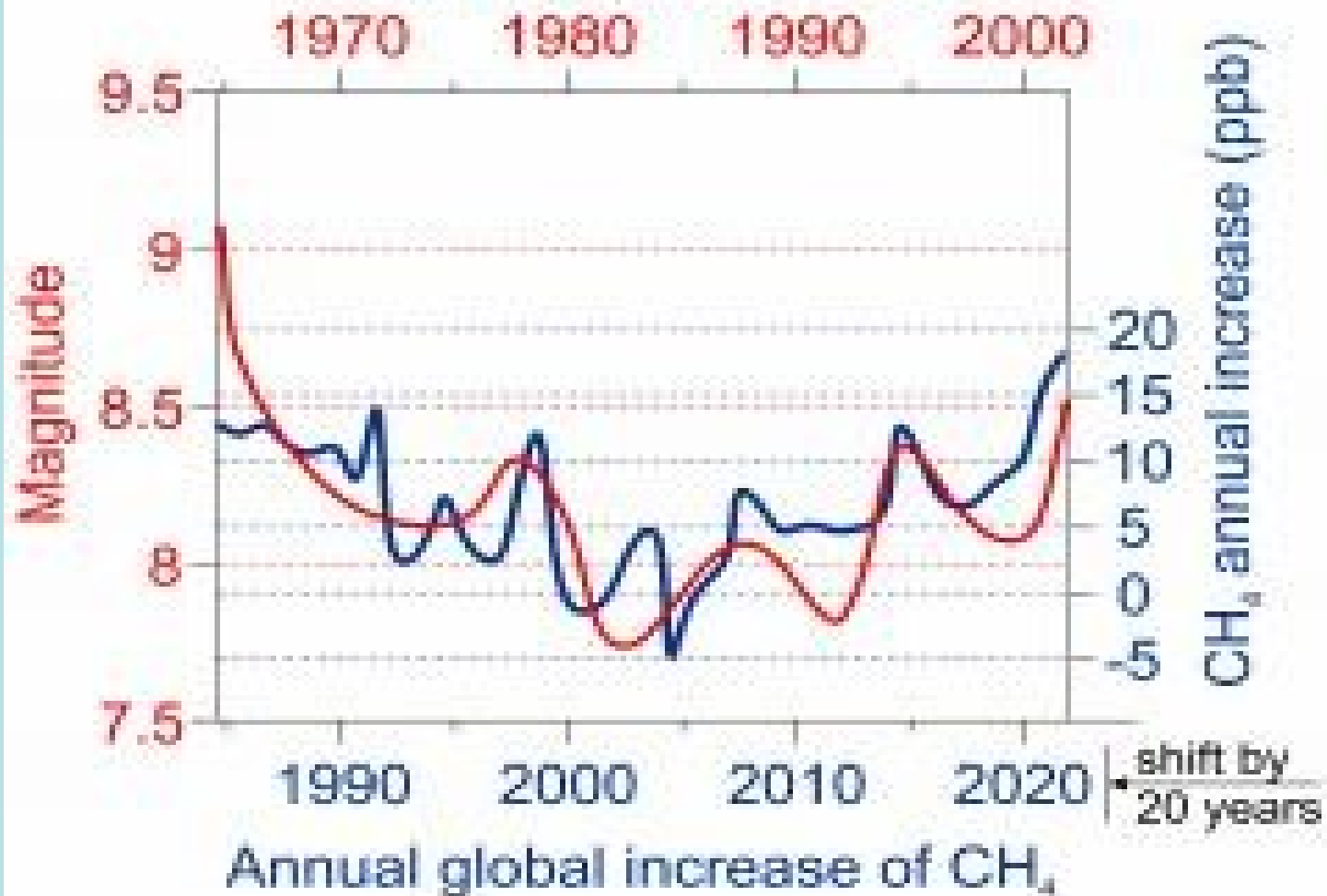
Abstract: A seismogenic trigger mechanism is proposed to explain the abrupt climate warming phases in the Arctic as a result of strong mechanical disturbances in the marginal region of the Arctic lithosphere. Those disturbances might have been caused by great earthquakes in the Aleutian subduction zone, and slowly propagated across the Arctic shelf and adjacent regions, triggering the methane release from permafrost and metastable gas hydrates, followed by greenhouse gas emissions into the atmosphere. The proposed mechanism is based on the identified correlation between the series of the great earthquakes in the Aleutian island arc, which occurred in the early and middle of the 20th century, and the two phases of sharp climate warming, which began in 1920 and 1980. There is a 20-year time lag between these events, which is explained by the time of arrival of deformation waves in the lithosphere (propagating with a velocity of about 100 km per year) at the Arctic shelf and adjacent land from the Aleutian subduction zone, the region of their generation. The trigger mechanism causing the methane release from permafrost and metastable gas hydrates is related to the destruction of micro-sized ice films covering gas hydrate particles, the elements highly important for hydrate self-preservation, as well as destruction of gas-saturated micropores in permafrost rocks due to the slight additional stresses associated with deformation waves, and thus emergence of conditions favorable for gas filtration and its subsequent emission.

Keywords: abrupt climate warming; Arctic; great earthquakes; Aleutian subduction zone; tectonic waves; trigger mechanism; permafrost; metastable gas hydrates; gas hydrates self-preservation; gas filtration; methane emissions

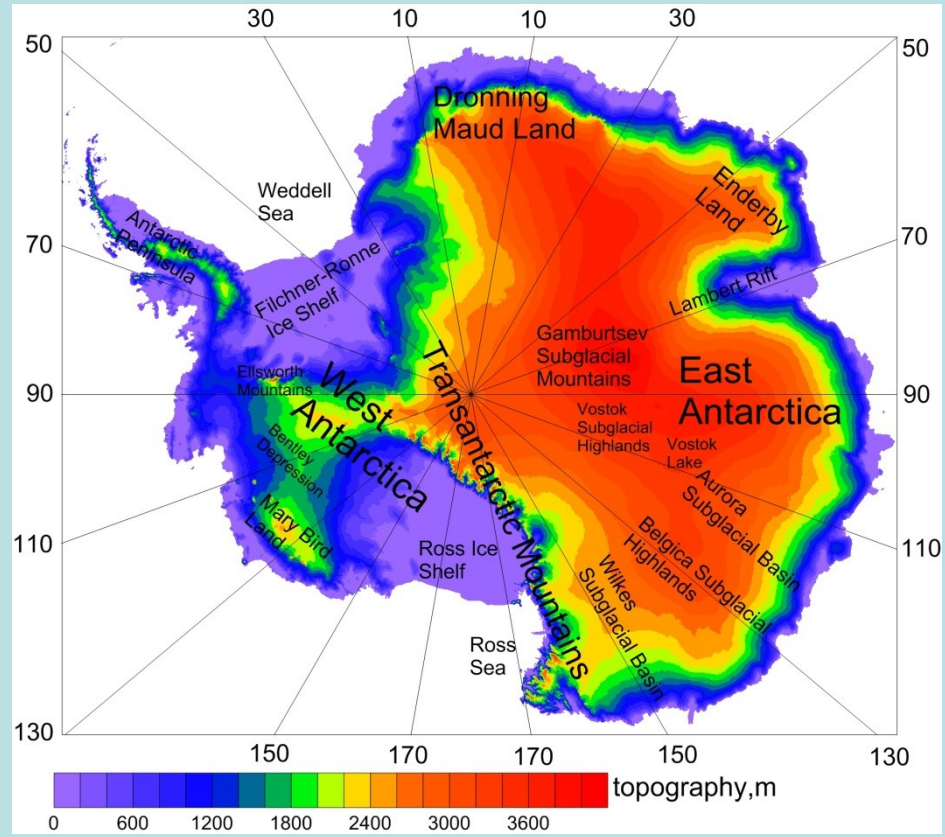
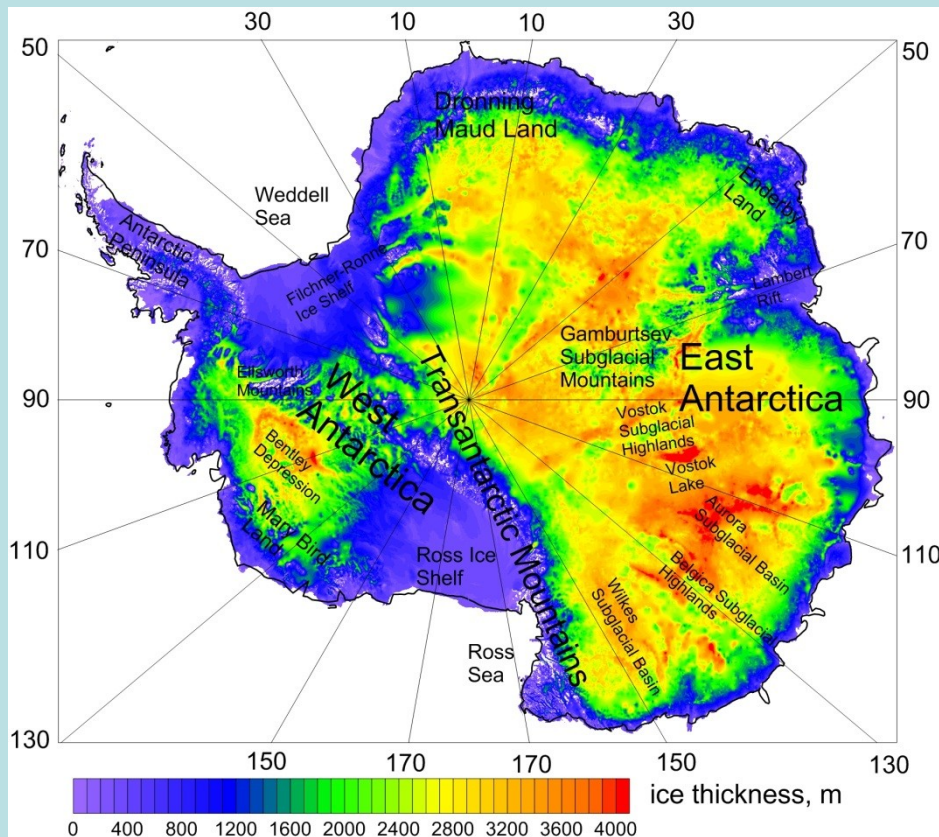
1. Introduction

Among the general problems of civilization, the global climate warming on Earth has recently become one of the cutting-edge challenges. A huge amount of literature has been written about the causes of global warming, while its most common explanation is considered to be the anthropogenic factor causing the greenhouse effect through the increased carbon dioxide emissions into the atmosphere due to the accelerated development of world industry. A number of mathematical models exist, describing the effect of carbon emissions on climate warming. However, the reasons for the sudden onset of periods of sharp global warming on Earth, especially in the Arctic region, remain unclear. Figure 1 shows the well-known temperature variation curve for the Arctic, with clearly visible two phases of a fairly abrupt increase in the average temperature in contrast to the background interannual fluctuations. The first phase of a noticeable warming falls within period between 1920 and 1940, while the second phase began around 1980 and is ongoing nowadays. A similar temperature curve is observed for entire Earth. From the standpoint of the theory of anthropogenic

Time sequence of global large earthquakes with Magnitude ≥ 7.5

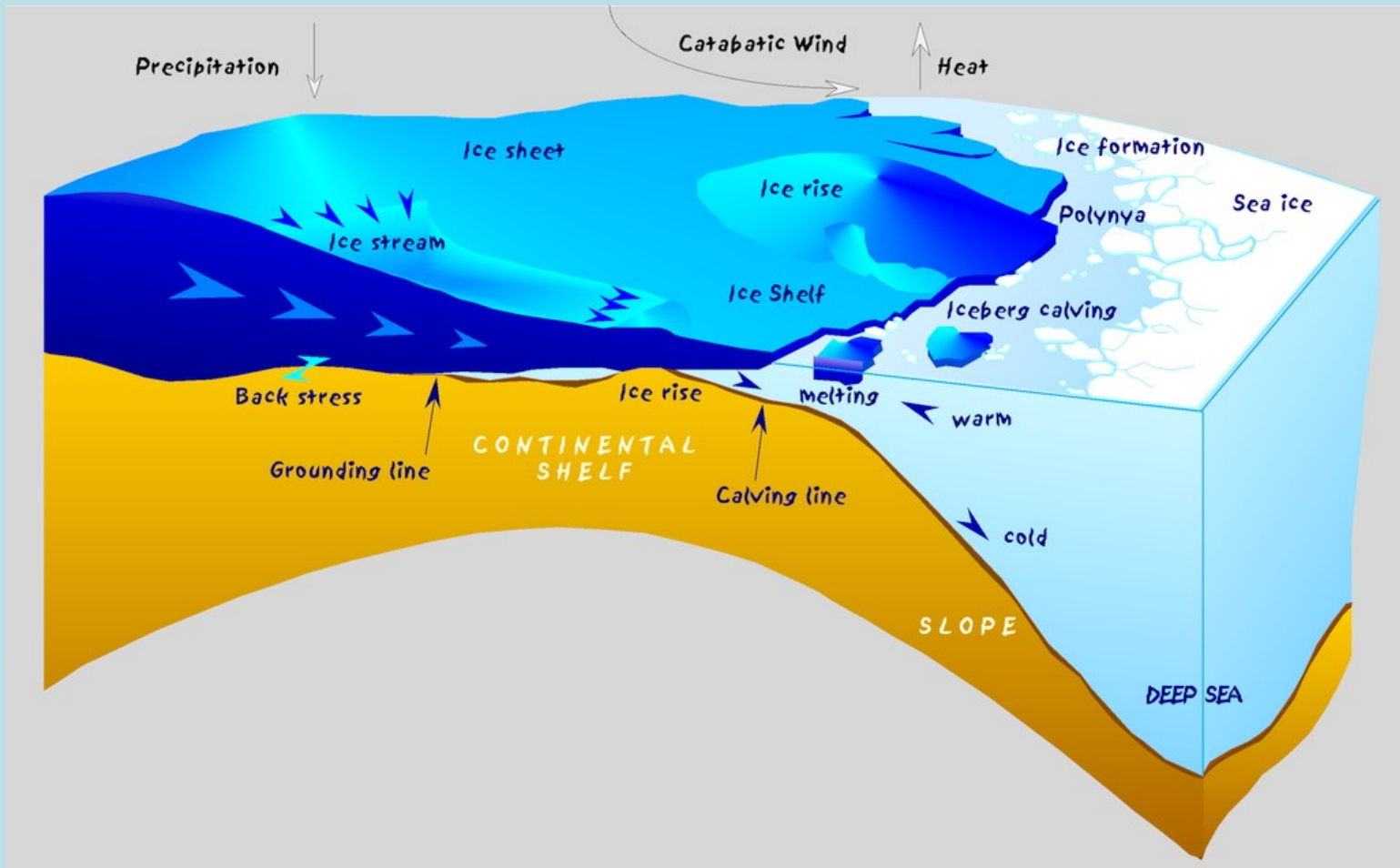


Ледовый щит Антарктиды

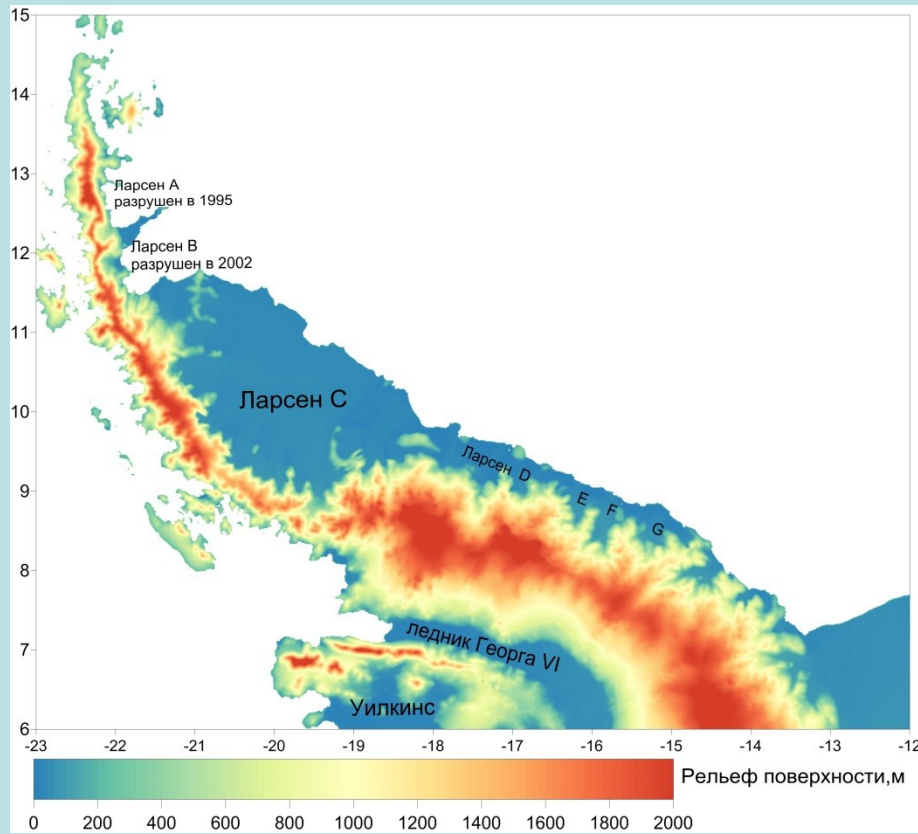


Толщина льда согласно BEDMAP2 [Fretwell et al., 2013.]
Средняя толщина льда 2 км, площадь 14 млн. кв. км,
объем 26.5 млн. куб. км. льда, что дает ~ 58 м повышения
уровня моря при полном таянии.
В настоящее время повышение уровня моря за счет
потепления составляет мм/год, а потери за год составляют
десятки-сотни куб. км. льда.

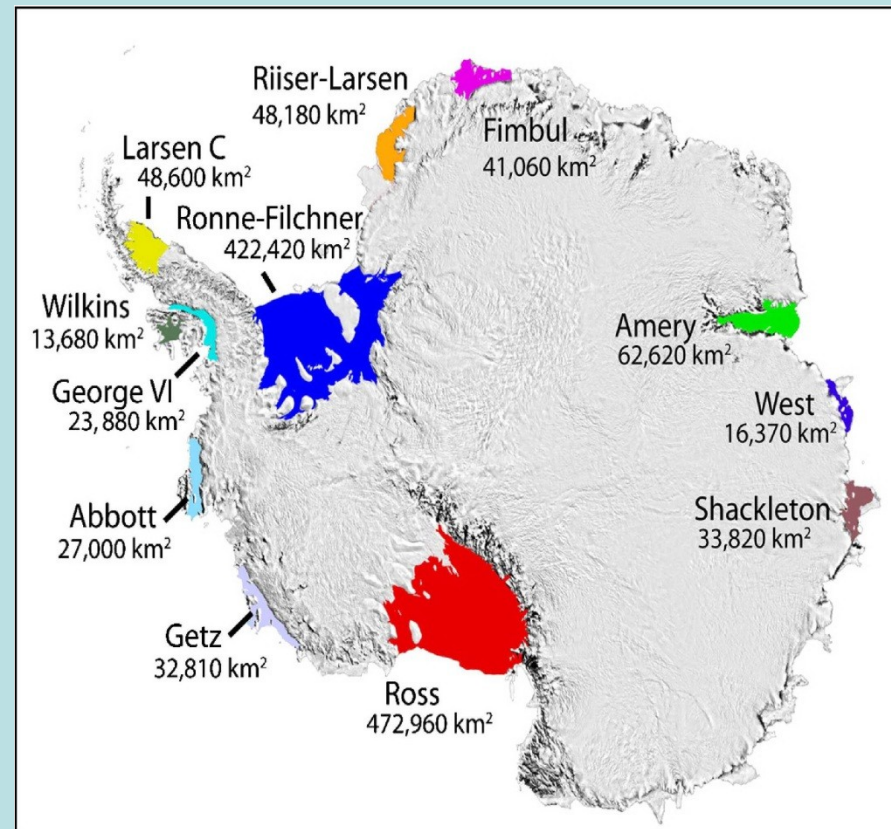
Поверхность ледового купола Антарктиды.



Основные шельфовые ледники Антарктиды

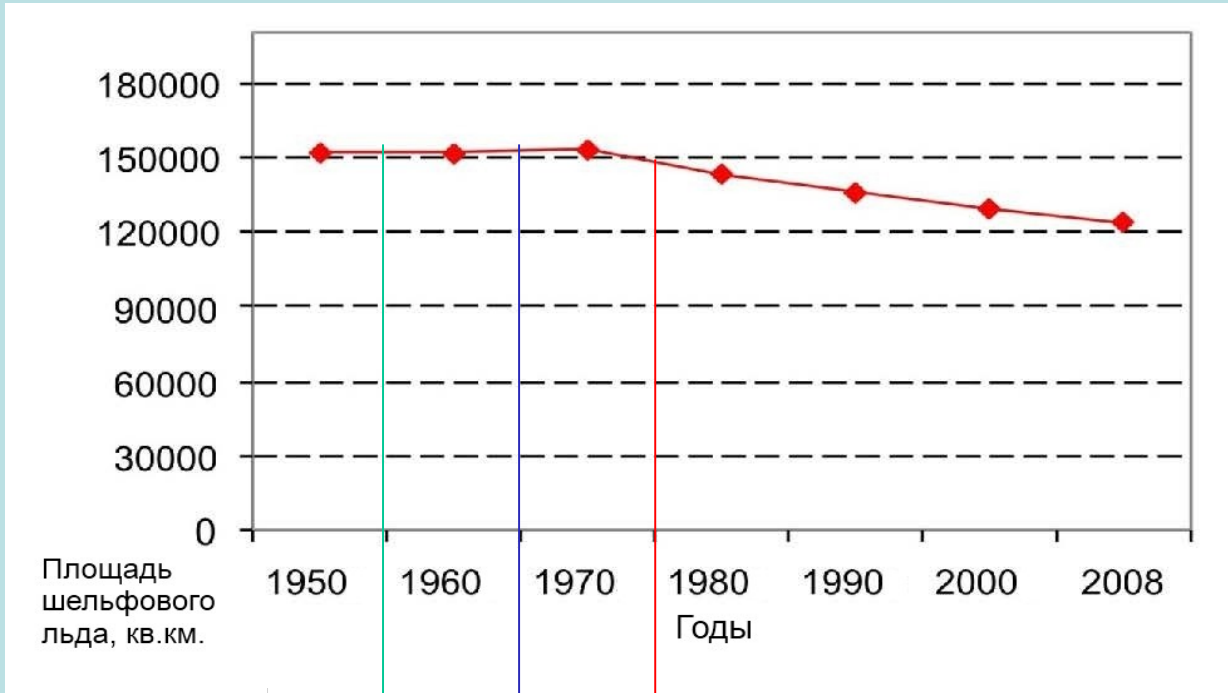


Рельеф поверхности Антарктического полуострова.

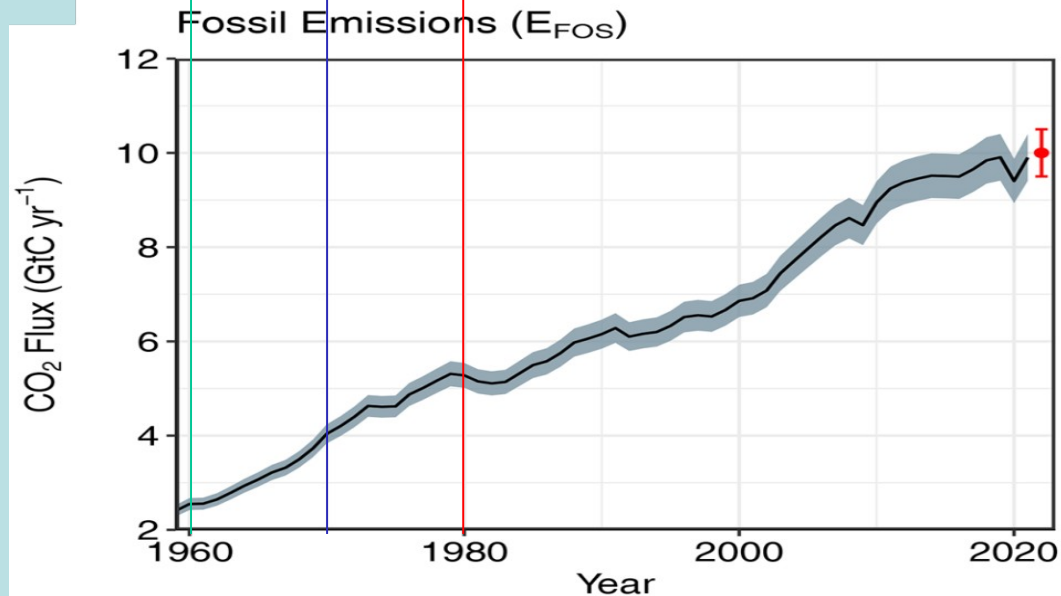


Основные шельфовые ледники

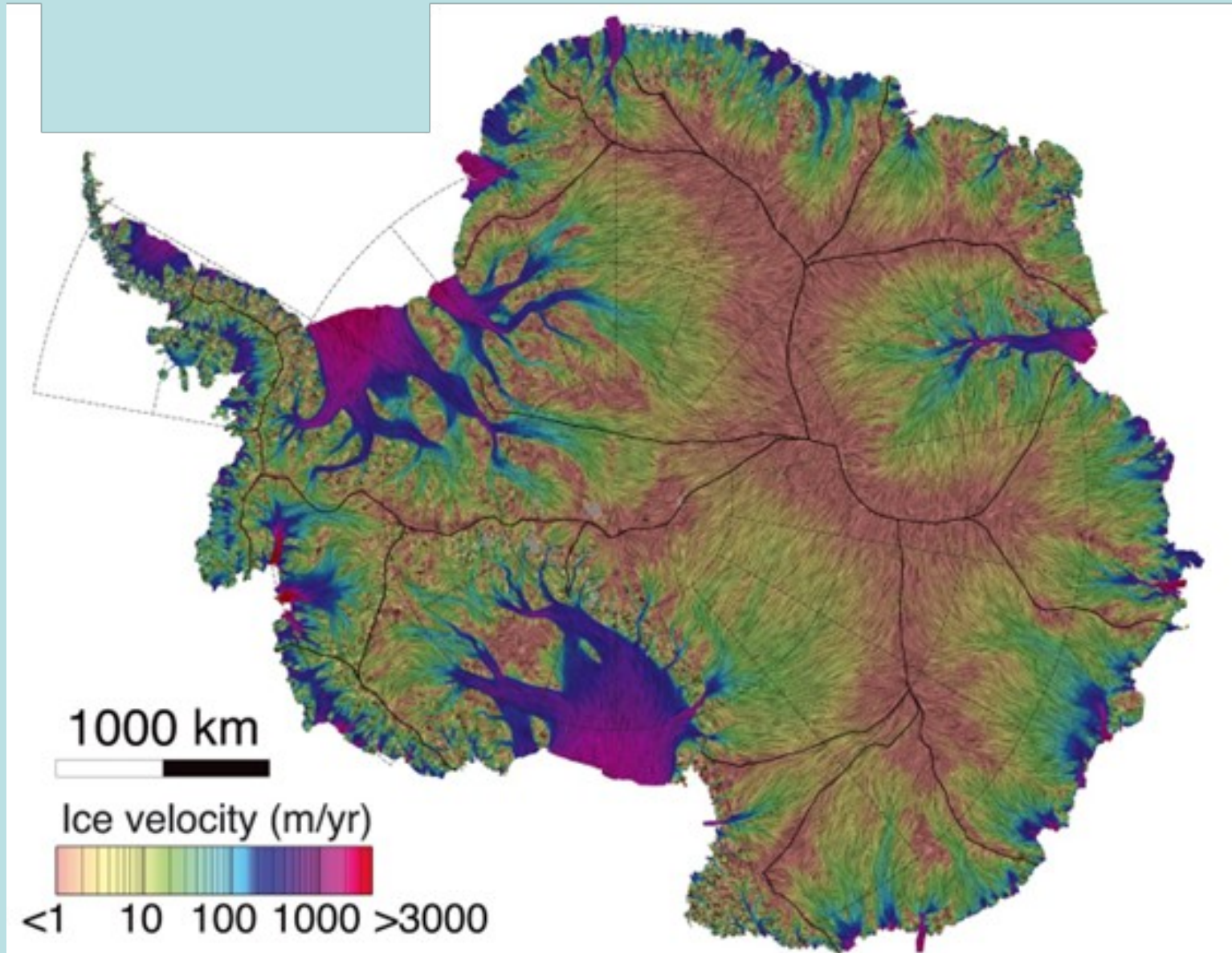
Общая площадь шельфовых ледников на Антарктическом полуострове за последние десятилетия согласно Cook and Vaughan. (2010). Анतिकорреляция с эмиссией человечеством CO₂ в 70х годах 20 века (Global Carbon Budget 2022, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4871-2022>)



<https://globalenergyprize.org/en/2023/01/13/russian-scientists-offer-new-hypothesis-on-warming-at-earths-poles/>

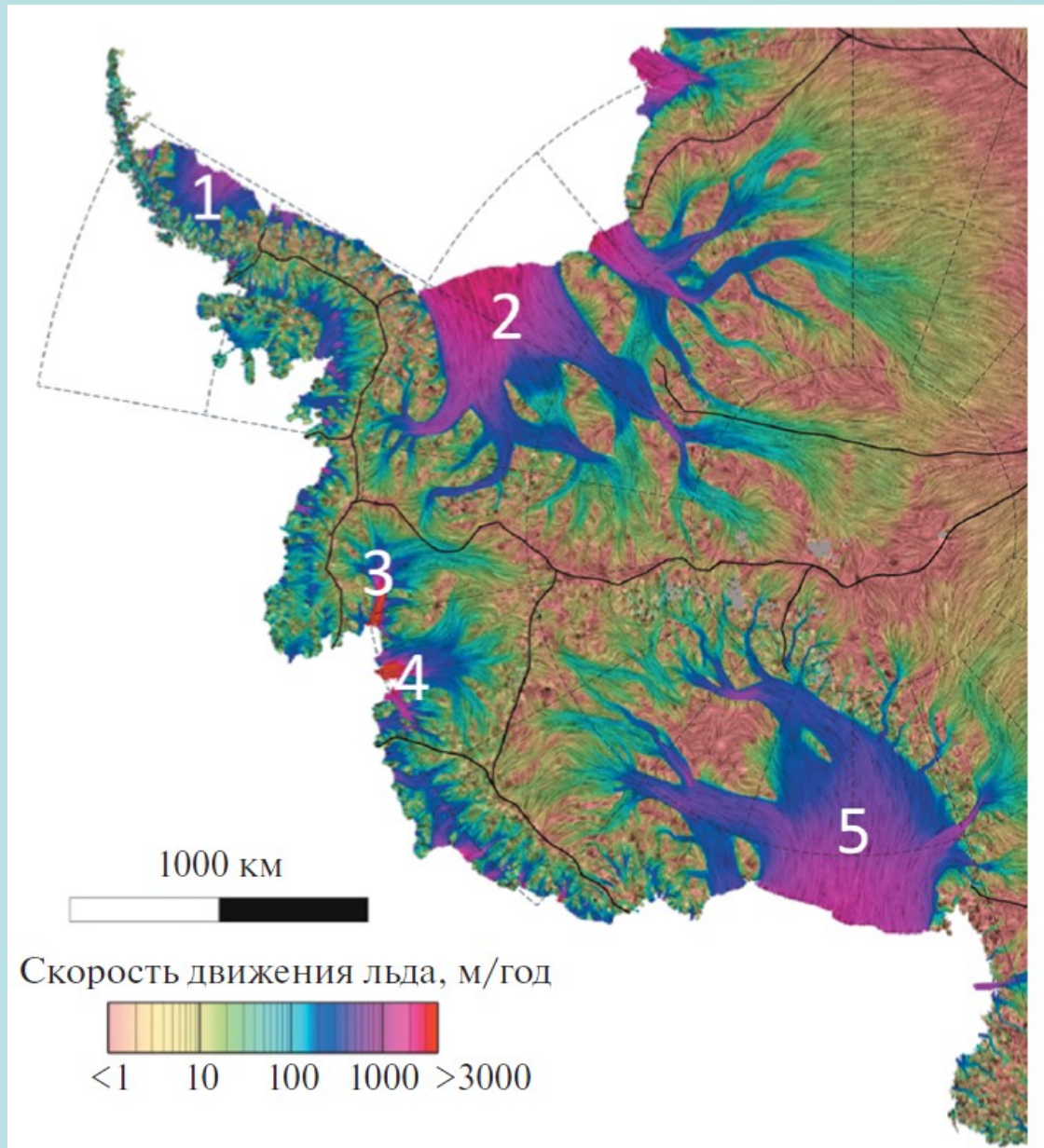


Скорости движения льда



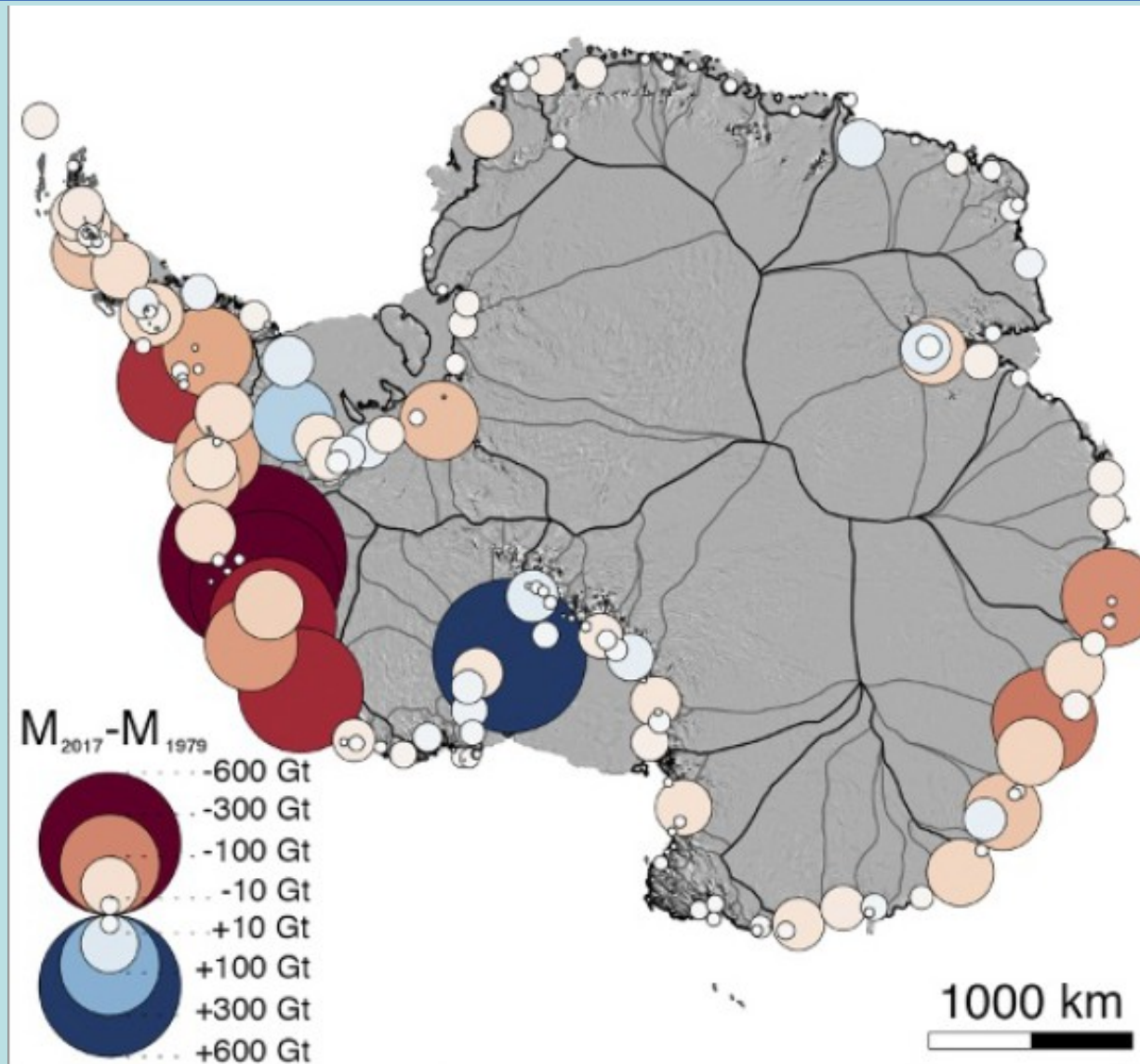
Скорость льда Антарктического ледникового щита, полученная на основе мультисенсорных данных за период 2014–2016 гг. [Rignot et al., 2018]. Черными линиями показаны ледоразделы.

Западная Антарктида



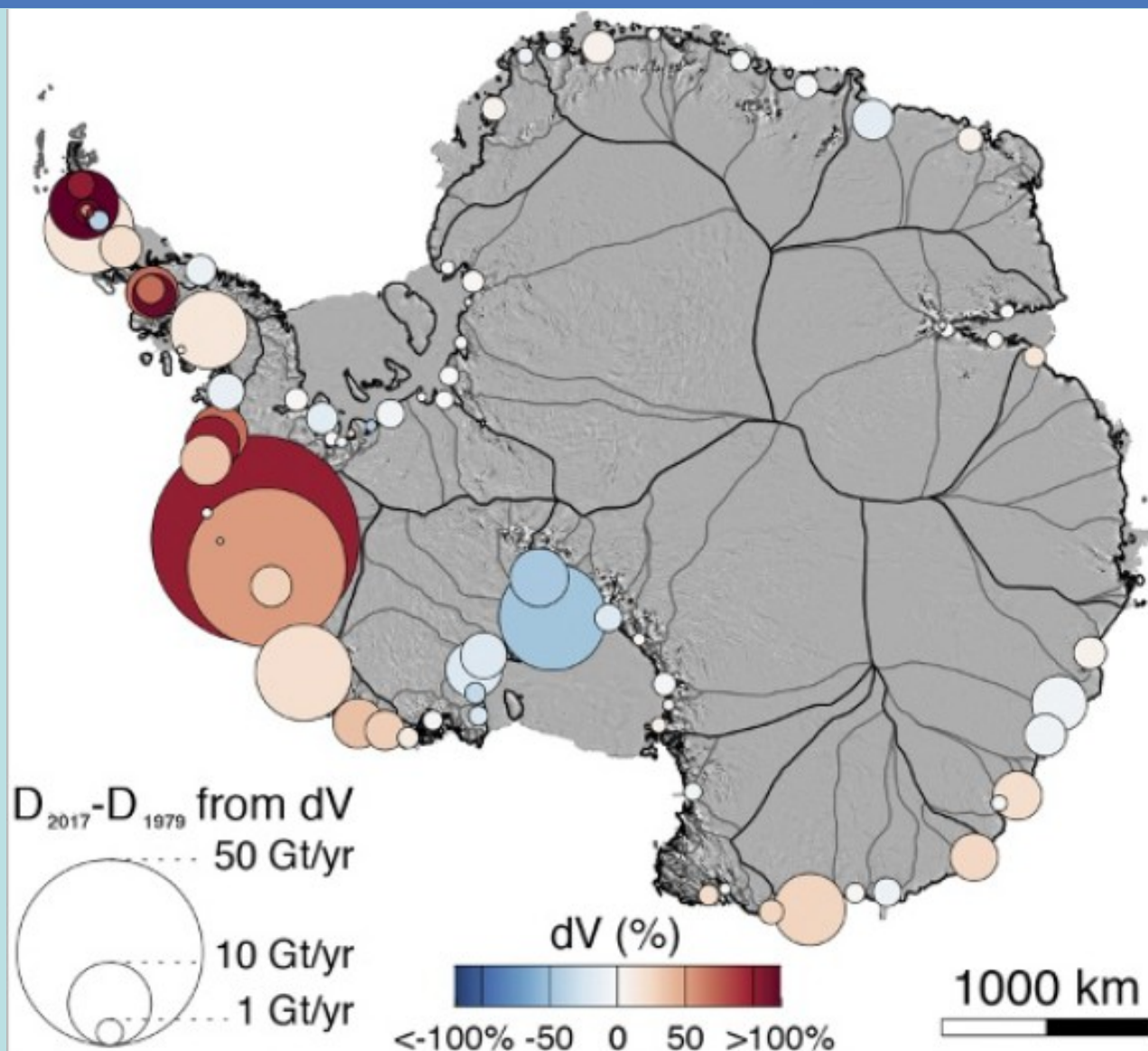
Цифрами отмечены быстродвижущиеся ледники: 1 – Ларсен С; 2 – Ронне; 3 – Пайн-Айленд; 4 – Туэйтс; 5 – Росса.

Баланс льда 1979-2017



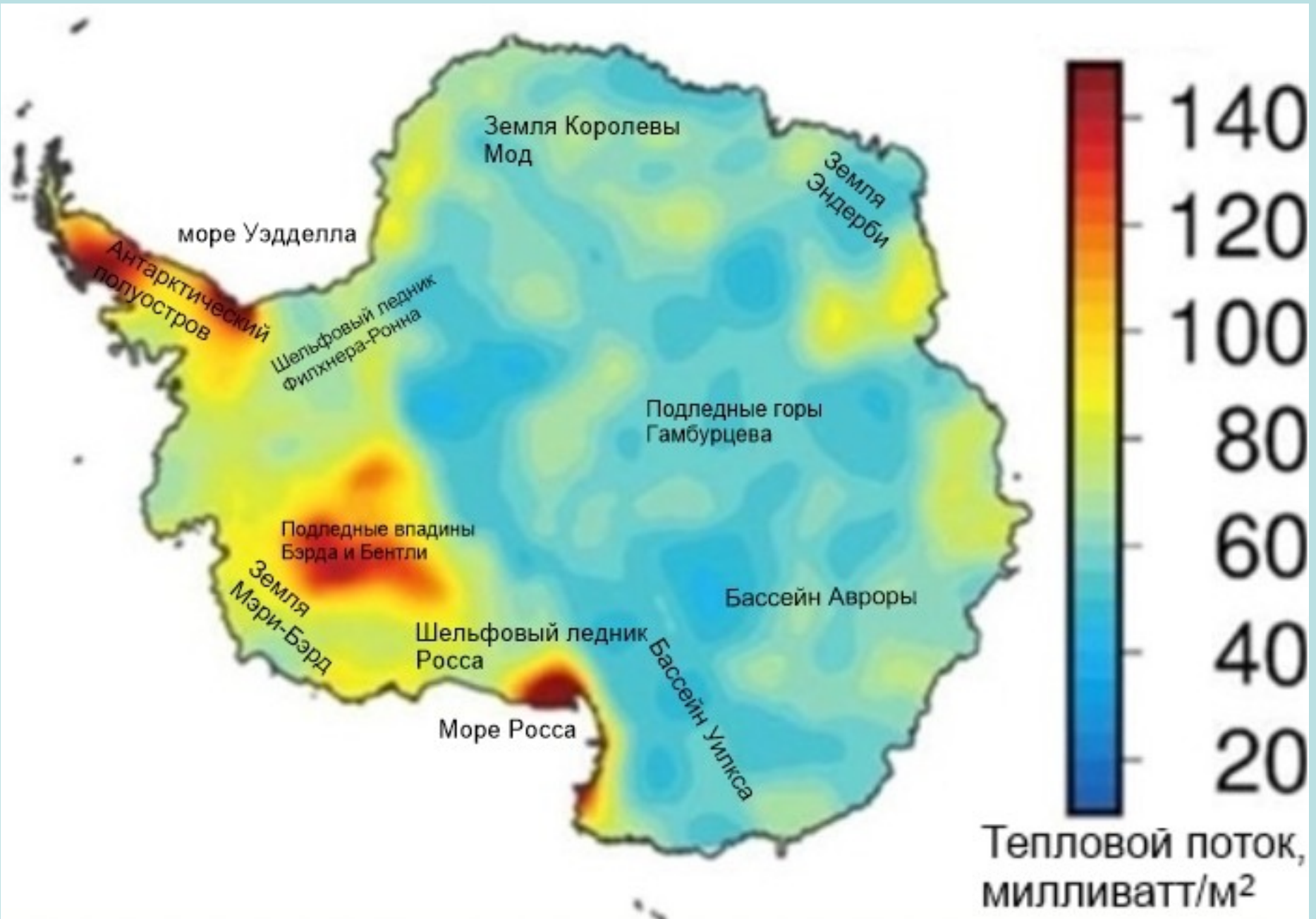
Общее изменение массы основных бассейнов, обозначенных цветом от синего (прирост) до красного (убыток) за 1979–2017 гг. С радиусом круга, пропорциональна абсолютному балансу масс [Rignot et al., 2018].

Изменение баланса льда

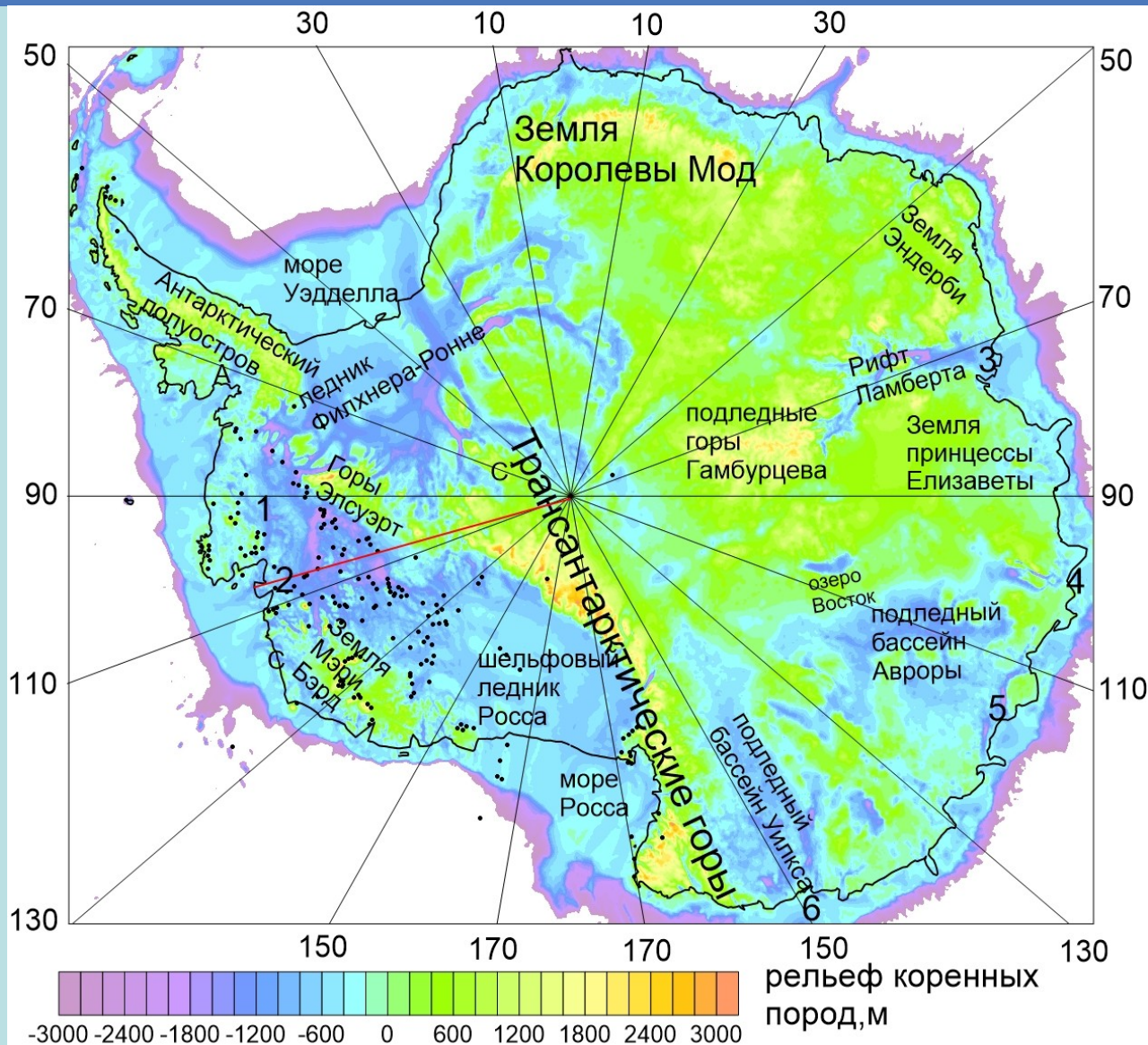


Изменение расхода льда в линии заземления, D , для 1979–2017 годы для 18 основных субрегионов в миллиардах тонн в год с процентным изменением скорости, имеющим цветовую маркировку от красного (ускорение) до синего (замедление), и радиус окружности пропорционален изменению [Rignot et al., 2018].

Карта теплового потока Антарктиды (Losing et al., 2020)

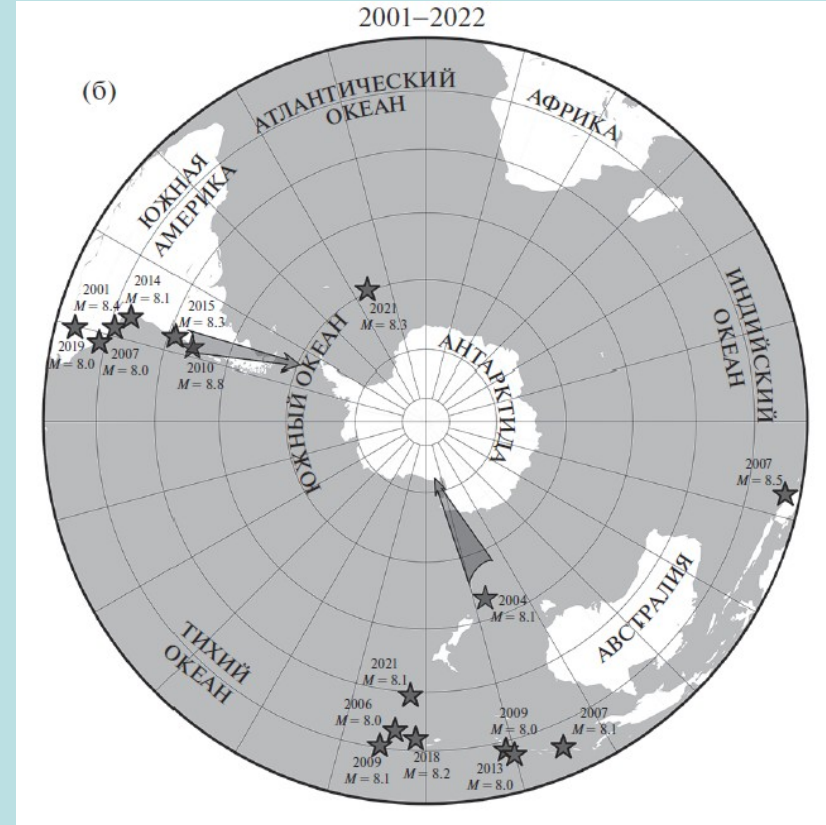
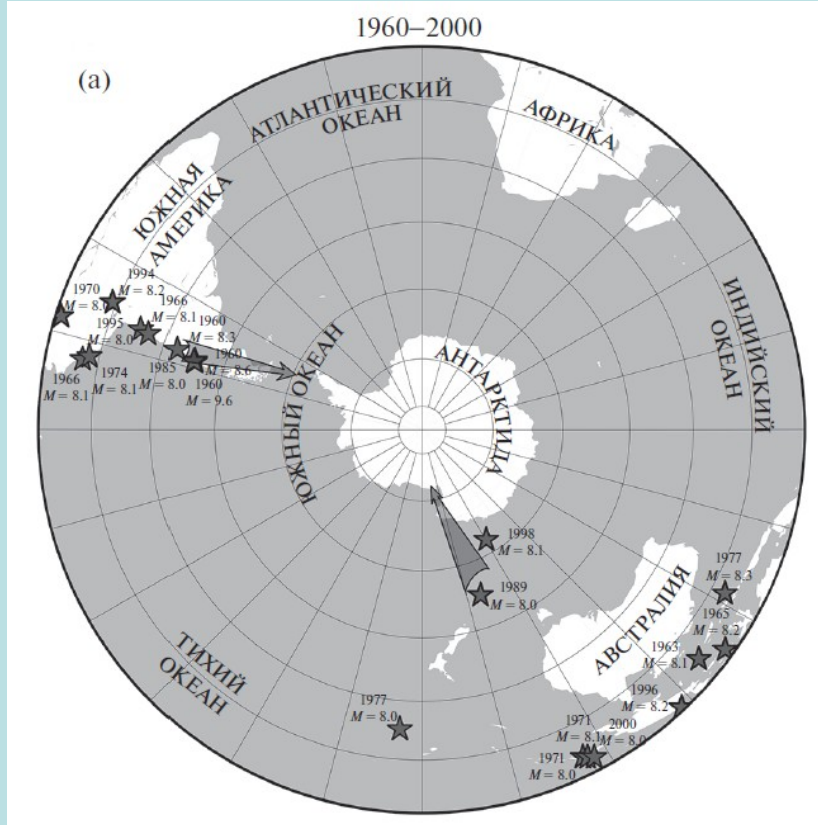


Подледный рельеф Антарктиды



Рельеф коренных пород Антарктиды по модели BEDMACHINE [Morlighem, 2020]. Красная линия – профиль от гор Элсуэрт до ледника Туýtтса. Вулканы отмечены черными точками [van Wyk de Vries et al., 2018]. Цифрами отмечены быстродвижущиеся ледники: 1 – Пайн (50 см); 2- Туýtтс (65 см); 3 – Ламберт (777 см); 4 – Денмен (149 см); 5 – Тоттен (385 см); 6 – Уилкса (158 см).

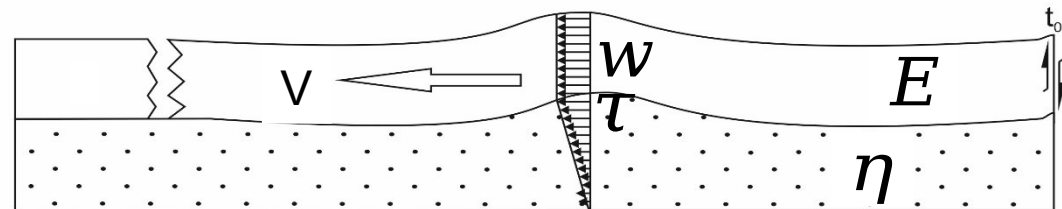
Распространение деформационных волн в Антарктический регион, вызванных сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции



- горизонтальное смещение в литосфере,

(Elsasser, 1968)

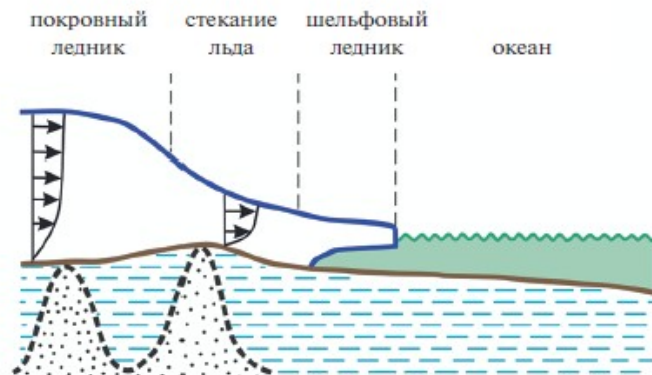
Скорость распространения волны возмущения



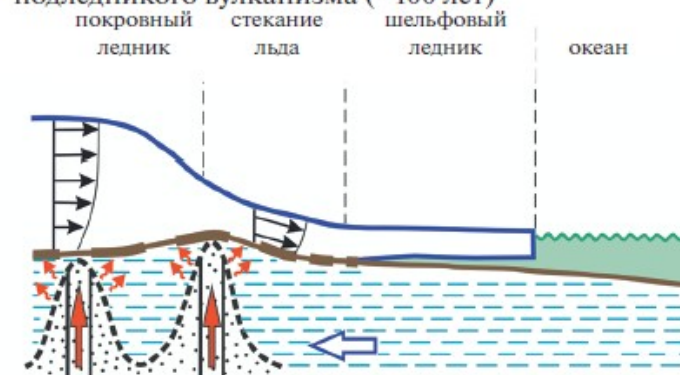
$V \approx 100$ км/год

Механизм ускорения покровного ледника от прихода деформационных волн

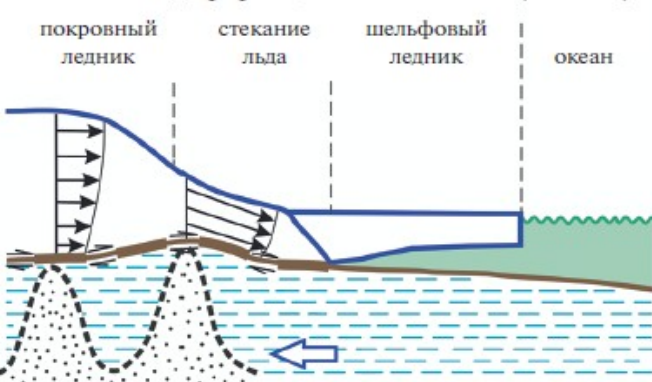
1. Стадия медленного вязкого течения ледника с прилипанием на подошве








2. Стадия скольжения ледника вследствие частичного плавления основания, вызванного активизацией подледникового вулканизма (~100 лет)

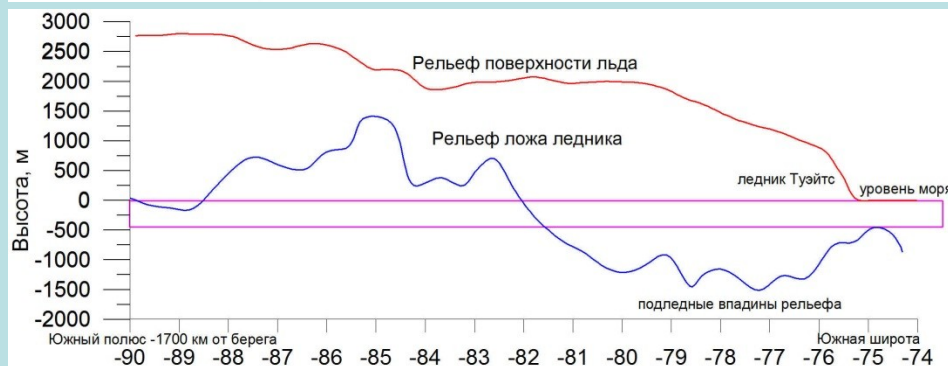


3. Стадия быстрого скольжения ледника вследствие разрушения зон прилипания, вызванного деформационной волной (~10 лет)



Условные обозначения:

-  профиль скорости медленного стекания
-  профиль скорости при скольжении
-  подледниковые вулканы
-  поверхность частичного плавления с зонами сильного прилипания
-  зоны нарушения прилипания
-  фильтрация магмы
-  осадочные породы, содержащие газовые гидраты
-  магматические каналы подледниковых вулканов
-  направление распространения деформационных волн



Лобковский и др., 2023,
Вестник РАН; Geosciences 2022;2023.

Оценка скорости течения ледника при прилипании и скольжении

Уравнения двумерного движения вязкой среды с реологией Глена при $n=3$ можно записать в виде [Pattyn, 2017]:

$$2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho_i g = 0 \quad (1)$$

$$\eta = \frac{A^{-1/3}}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{-1/3}$$

При условии прилипания ледника к подошве из второго уравнения системы (1) получим оценку:

$p \sim \rho g Z_s$ где Z_s - рельеф ледника

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^{1/3} \sim A^{1/3} \rho_i g h \frac{\partial (h_s + h_b)}{\partial x} \Rightarrow u \sim Ah \left(\rho_i g h \frac{z_s + z_b - z_{\min}}{L} \right)^3 \sim Ah \left(\rho_i g h \frac{h}{L} \right)^3$$

скорость ледника составляет ~ 23 м/год.

Для условия скольжения можно получить оценку:

$$u \sim \frac{3 + h\gamma}{h\gamma} Ah \left(\rho g h \frac{z_s + z_b - z_{\min}}{L} \right)^3$$

Для Кулоновского закона трения

$$\eta \frac{u}{h} \sim F_{tr} \sim \mu (\rho_i g h - p_w) \quad \text{Здесь } \mu - \text{коэффициент трения; } p_w - \text{давление.}$$

$$\gamma \sim 5 \frac{10^4}{h\mu^3} \left(\frac{h}{L} \right)^3 \quad \text{коэффициент, характеризующий трение, который определяется из граничного условия проскальзывания на подошве ледника}$$

Отсюда получаем оценку для скоростей ледника в случае проскальзывания

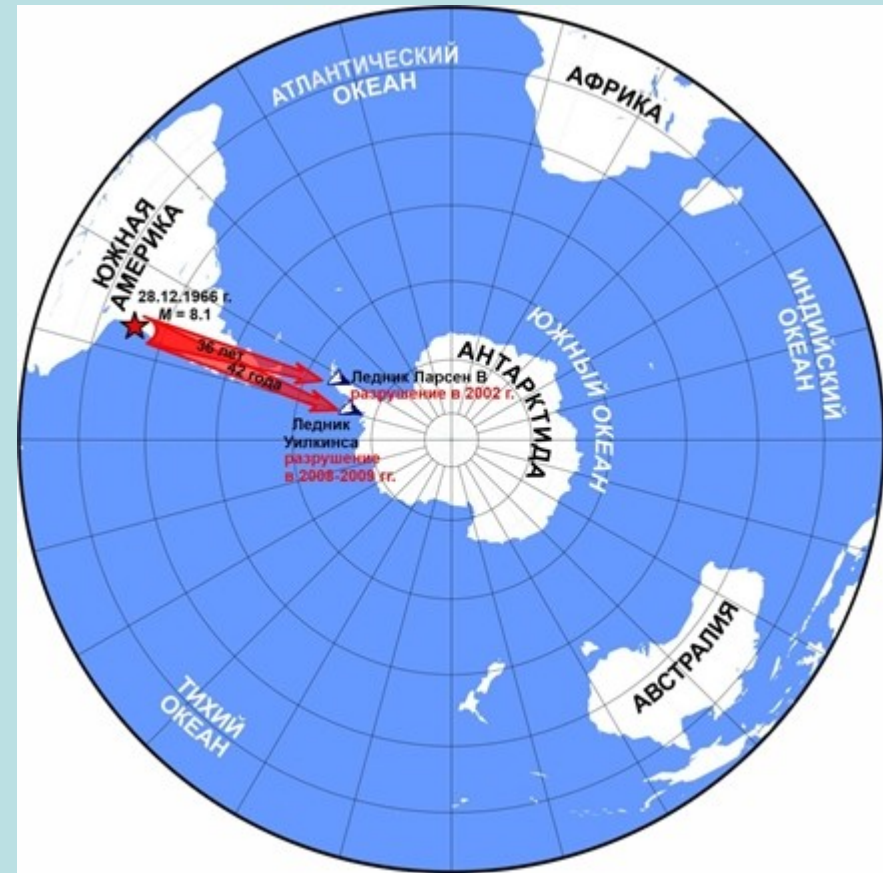
$$u \sim \frac{3 + h\gamma}{h\gamma} Ah \left(\rho g h \frac{h}{L} \right)^3$$

скорость ледника составляет ~ 3000 м/год [Lobkovsky et al., 2023, Geosciences].

Корреляция фаз разрушения ледников западной Антарктиды и сильнейших землетрясений Чилийской зоны субдукции



Корреляция фаз разрушения ледников Парсен А в 1995 г., Уилкинс в 1998 г., Георг VI в 2001 г. и Великого Чилийского землетрясения 1960 г. ($M=9.5$).



Корреляция фаз разрушения ледников Парсен В в 2002 г., Уилкинс в 2008-2009 гг. и сильнейшего Чилийского землетрясения 1966 г. ($M=8.1$).

Корреляция фаз разрушения ледников западной Антарктиды и сильнейших землетрясений в Чили и вблизи о.Маккуори

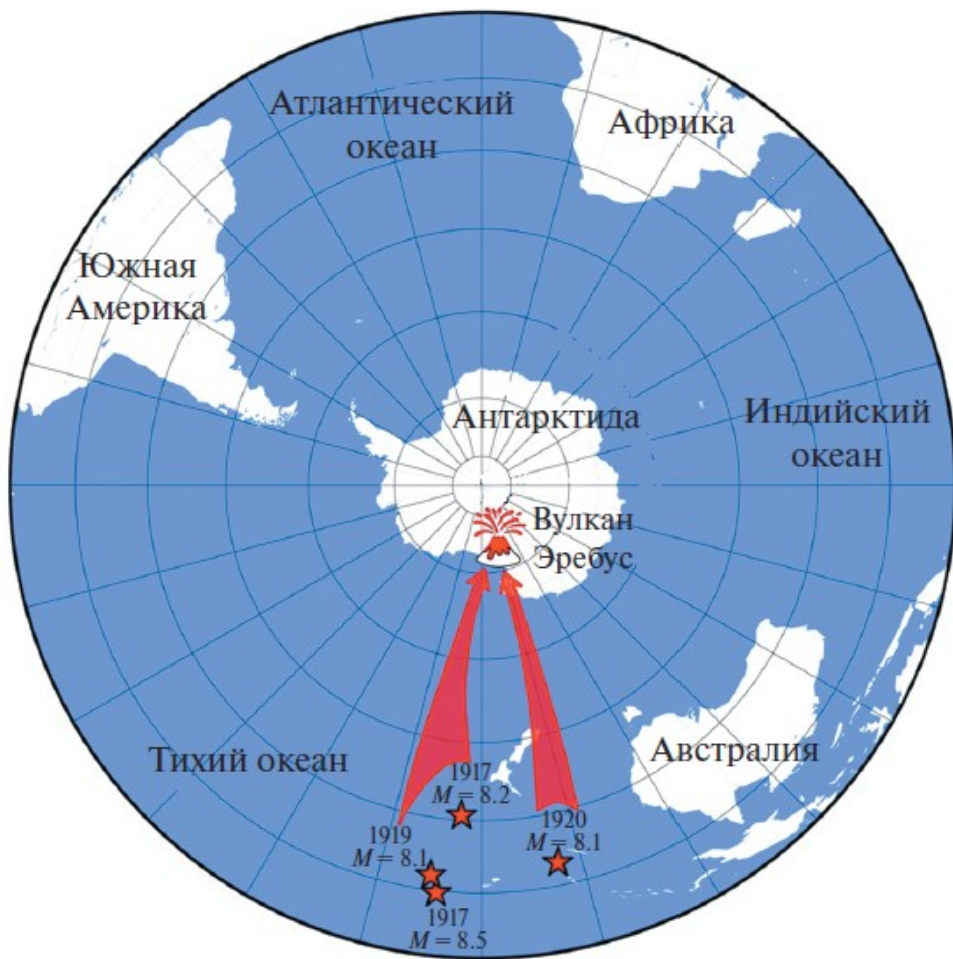


Корреляция фаз разрушения ледников Ларсен С в 2017 г., Уилкинс в 2013 г. и землетрясения в Чили 1985 г. (M=8.0)



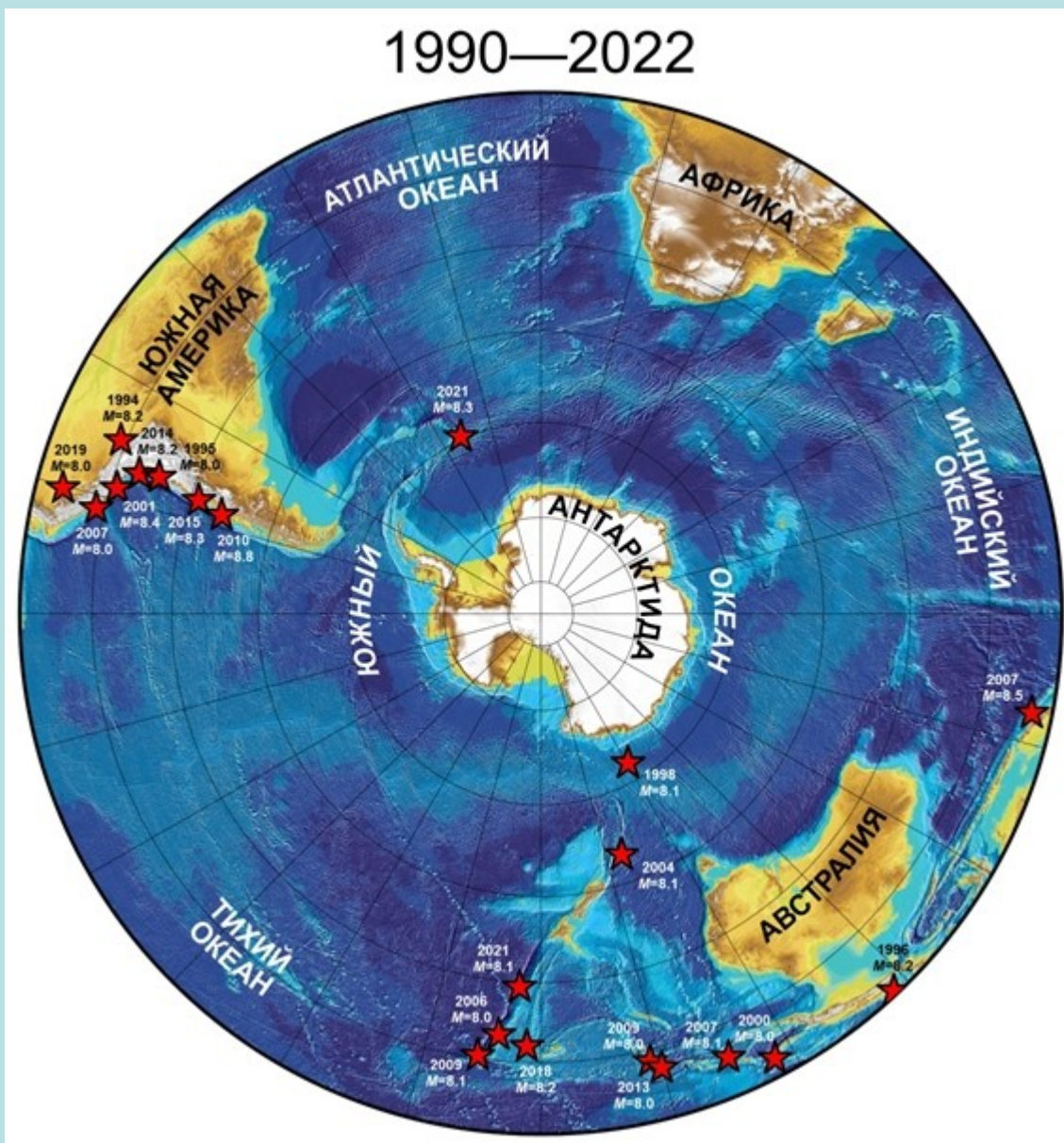
Корреляция фаз разрушения шельфового ледника Росса в 2000 г. и сильнейшего землетрясения в районе о-ва Маккуори в 1989 г. (M=8.0)

Связь землетрясений и извержений вулкана Эребус



Годы извержений Эребуса	Сильное Землетрясение	Расстояние, запаздывание
1972-1974	субдукция Кермадек M=8.2, 1917 M=8.5, 1919 M=8.1, 1920	Расстояние 5500–6000 км, ~55 лет.
2005, 2006, 2008, 2011, 2015, 2018	Южное тихоокеанское поднятие M=8.1, 1998 Хребет Макуори, M=8.0, 1989	2000 км 2900 км 15-20 лет

Сильнейшие землетрясения ($M > 8$) вокруг Антарктиды, указывающие на продолжение разрушения ледников и потепления климата в 21 веке.



Спасибо за внимание