



**Институт космических исследований
РАН**

Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Михайлов М.В.

**Исследование причин и
последствий таяния льдов
Арктики**

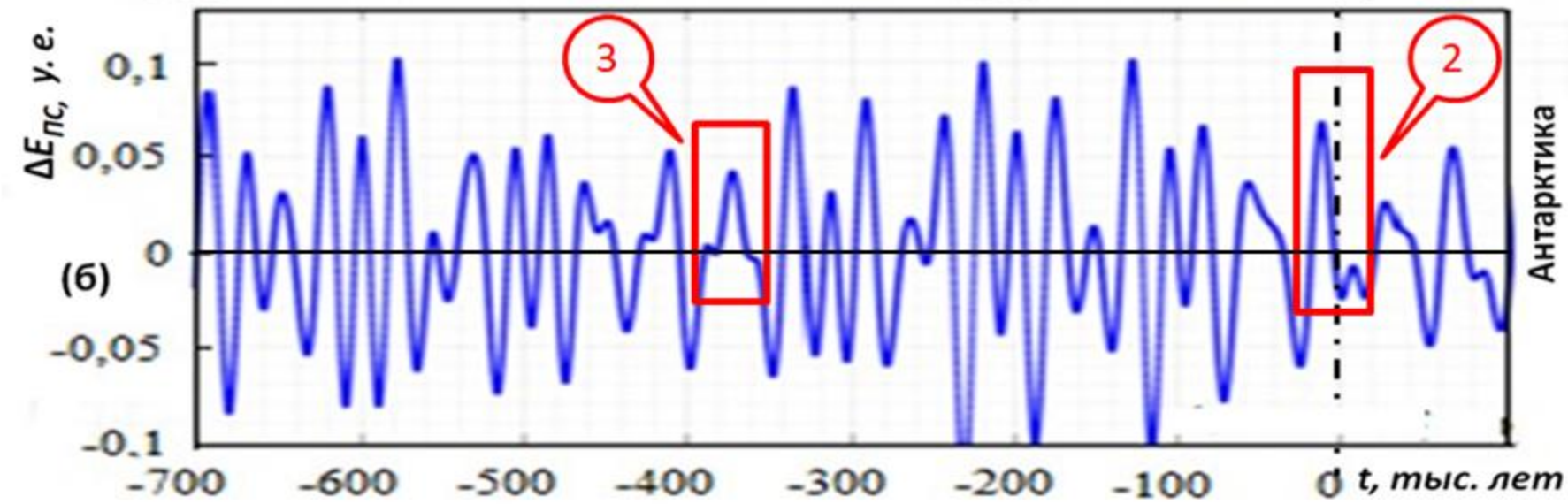
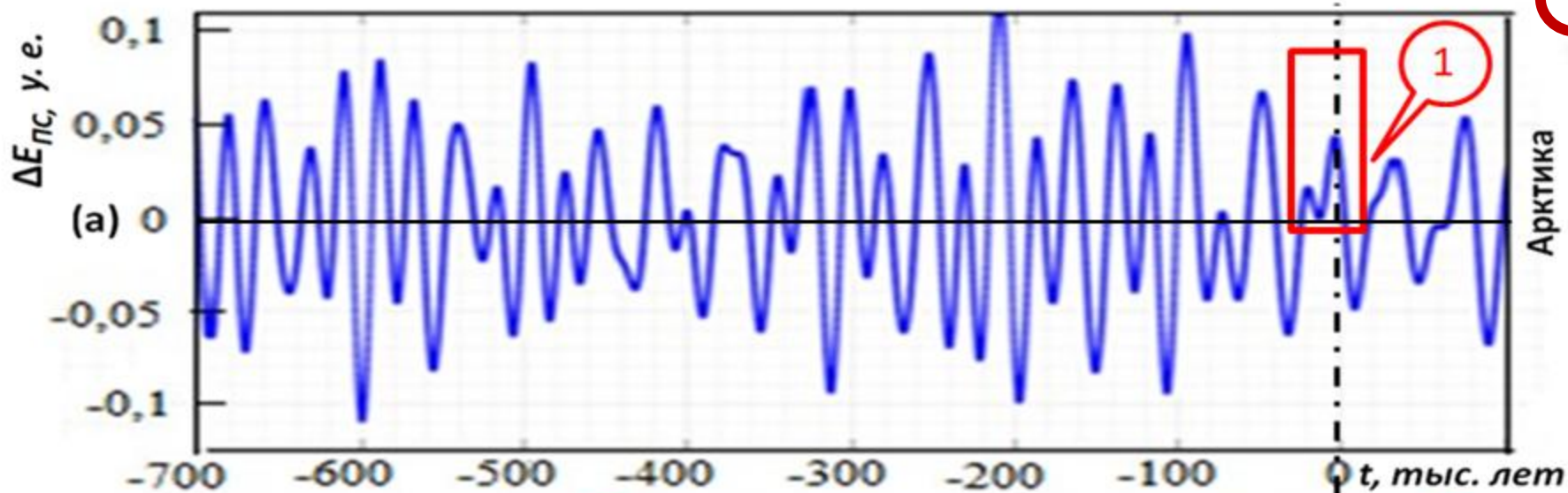
Москва, 2024

В модели приняты следующие допущения:

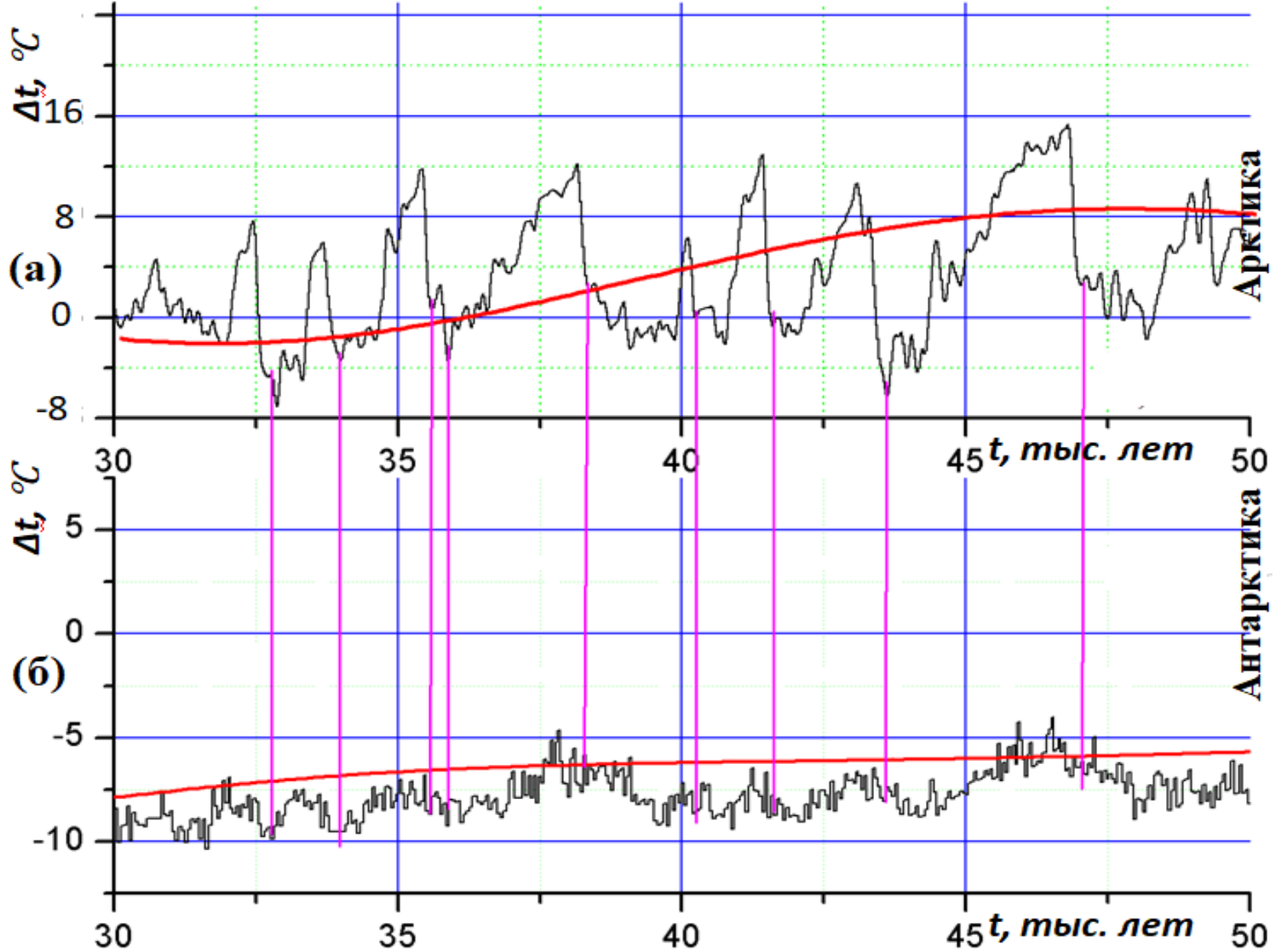
- Используемые для расчетов формулы определяют условный дисбаланс зон полярных дней и ночей соответственно Северного и Южного полярного круга в зависимости от текущих значений наклона оси вращения Земли, эксцентриситета ее орбиты и угла прецессии. Сегодня значения этих параметров орбиты Земли хорошо известны, по крайней мере на интервале ± 1 млн. лет (Михайлов, Константинов, 2021, Аванесов, Михайлов, 2023).
- В модели предполагается, что при постоянном номинальном наклоне оси вращения Земли и постоянном нулевом эксцентриситете ее орбиты на планете установились бы стационарные полярные шапки постоянной средней величины. Будем называть их средними полярными шапками.
- При этом разность энергии инсоляции ($\Delta E_{\text{ПС}}$) за время полярного дня ($E_{\text{ПД}}$) и энергии излучения за время полярной ночи ($E_{\text{ПН}}$) будет равна 0. Значения $\Delta E_{\text{ПС}} = E_{\text{ПД}} - E_{\text{ПН}}$, полученные при других значениях эксцентриситета и наклона оси вращения назовем приращением энергии инсоляции за полярные сутки.
- Положительные значения $\Delta E_{\text{ПС}}$ обозначают наличие профицита энергии: за время полярного дня тает больше льда, чем намораживается за ночь. Отрицательные значения $\Delta E_{\text{ПС}}$ обозначают дефицит энергии: площади льдов растут, полярные шапки увеличиваются.
- В баланс энергии полярной зоны помимо рассматриваемых, вносят вклад и другие процессы (отражение солнечного излучения, горизонтальный перенос тепловой энергии и др.), которые здесь не учитываются.

Астрономическая модель инсоляции зон полярных суток Земли

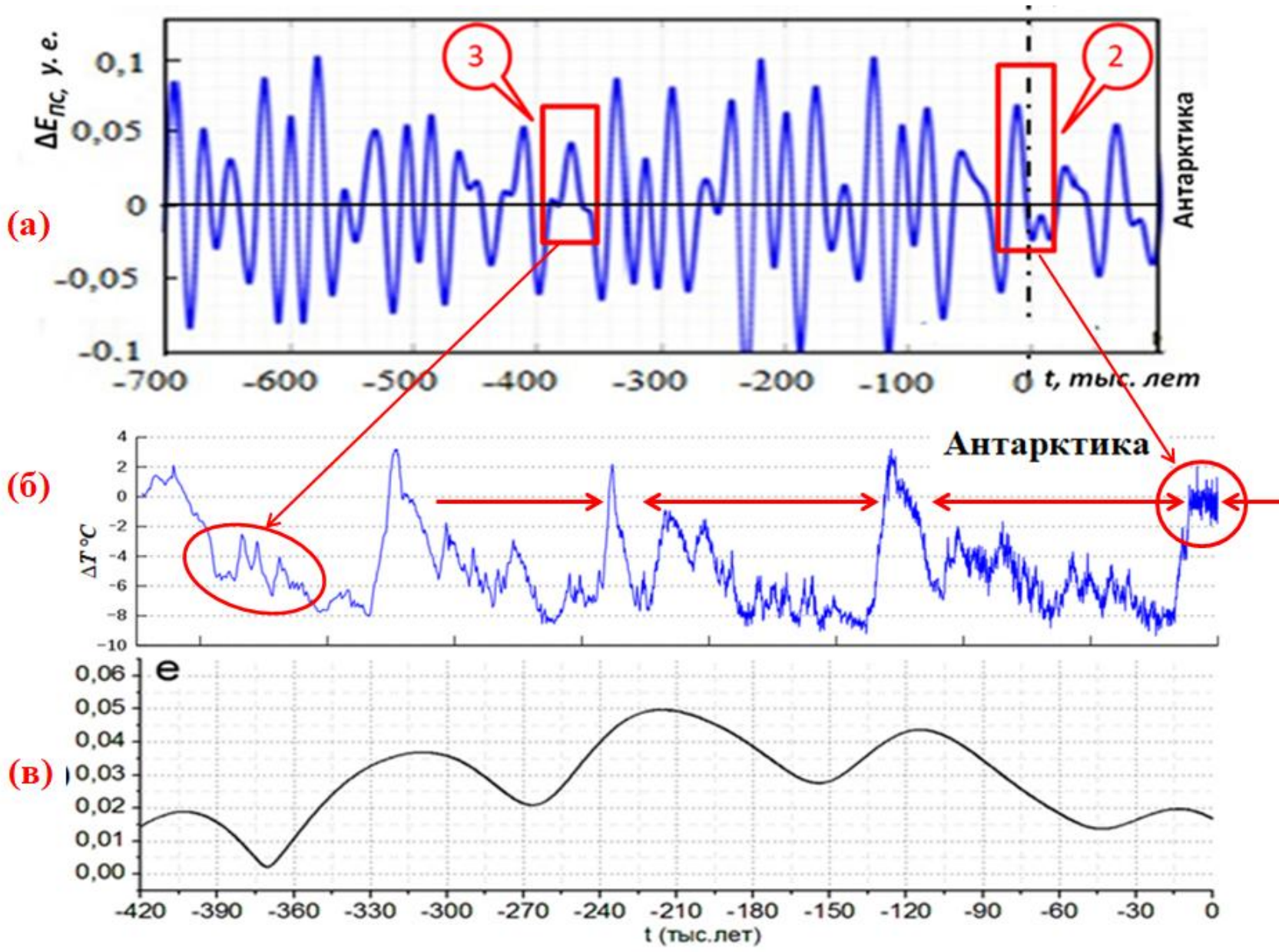
3



Графики условного дисбаланса энергии зон полярных суток, $\Delta E_{\text{ПС}}$ для: Арктики (а) и Антарктики (б).



Фрагменты графиков хода среднегодовых температур в Арктике (а) и в Антарктике (б). Красным цветом показаны фрагменты модели.



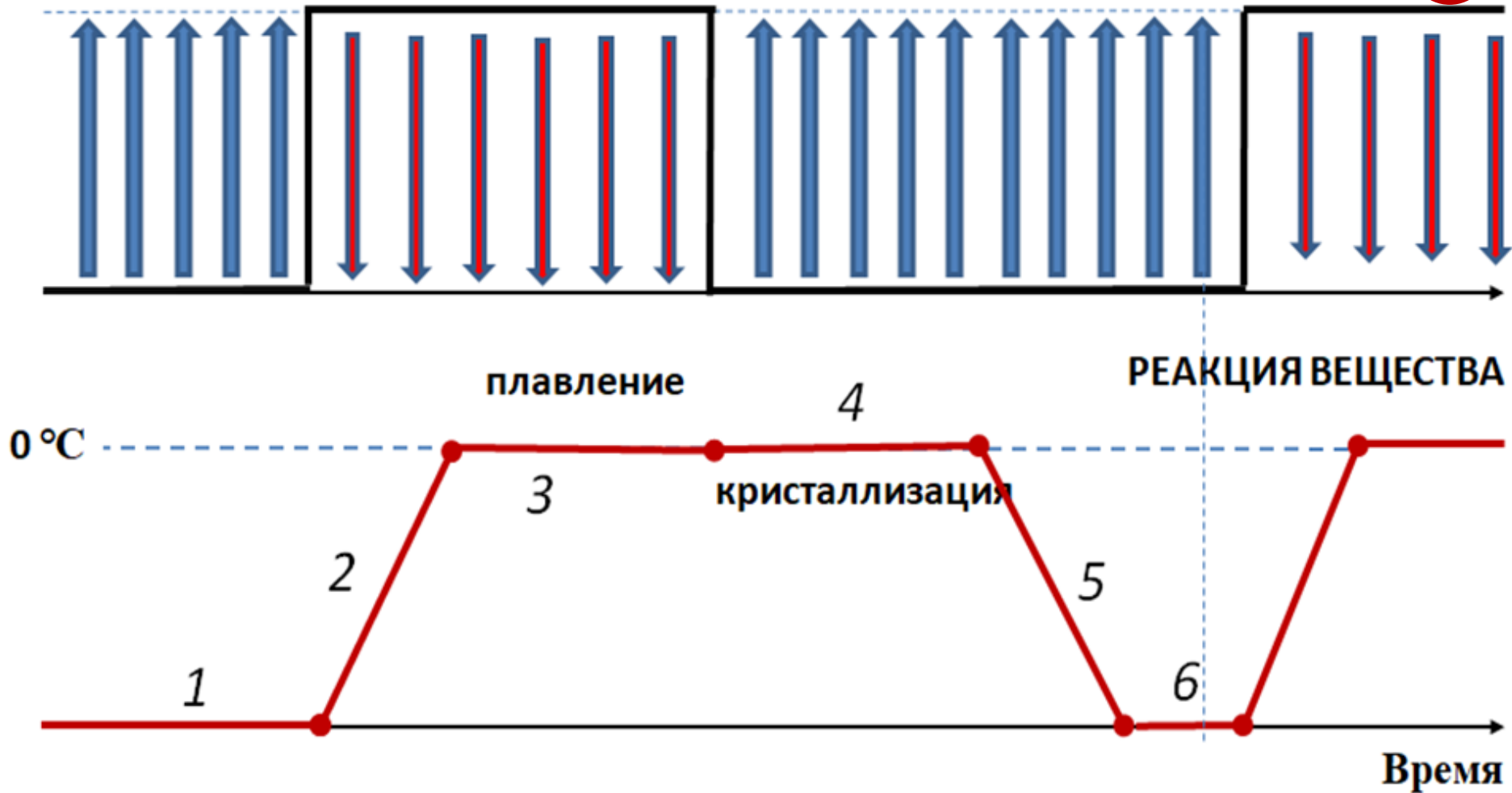
Дисбаланс энергии инсоляции в Антарктике – (а); вариации среднегодовых температур в Антарктике – (б); периоды изменений эксцентриситета Земли – (в)



Сравнение приращений температур в Антарктике и в Гренландии по данным, полученным по ледяным кернам (GISP - Greenland Ice Sheet Project).

Циклически изменяющийся тепловой поток

7



Циклограмма работы идеального теплового аккумулятора.

Чтобы нагреть 1 кг льда на 1°C необходимо истратить $2100 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$, а для преодоления фазового перехода при таянии 1 кг льда необходимо истратить 332 кДж , т.е. в 158 раз больше. При этом количество энергии, выделяемое жидкой водой при замерзании, численно равно количеству энергии, необходимой для таяния такой же массы льда.

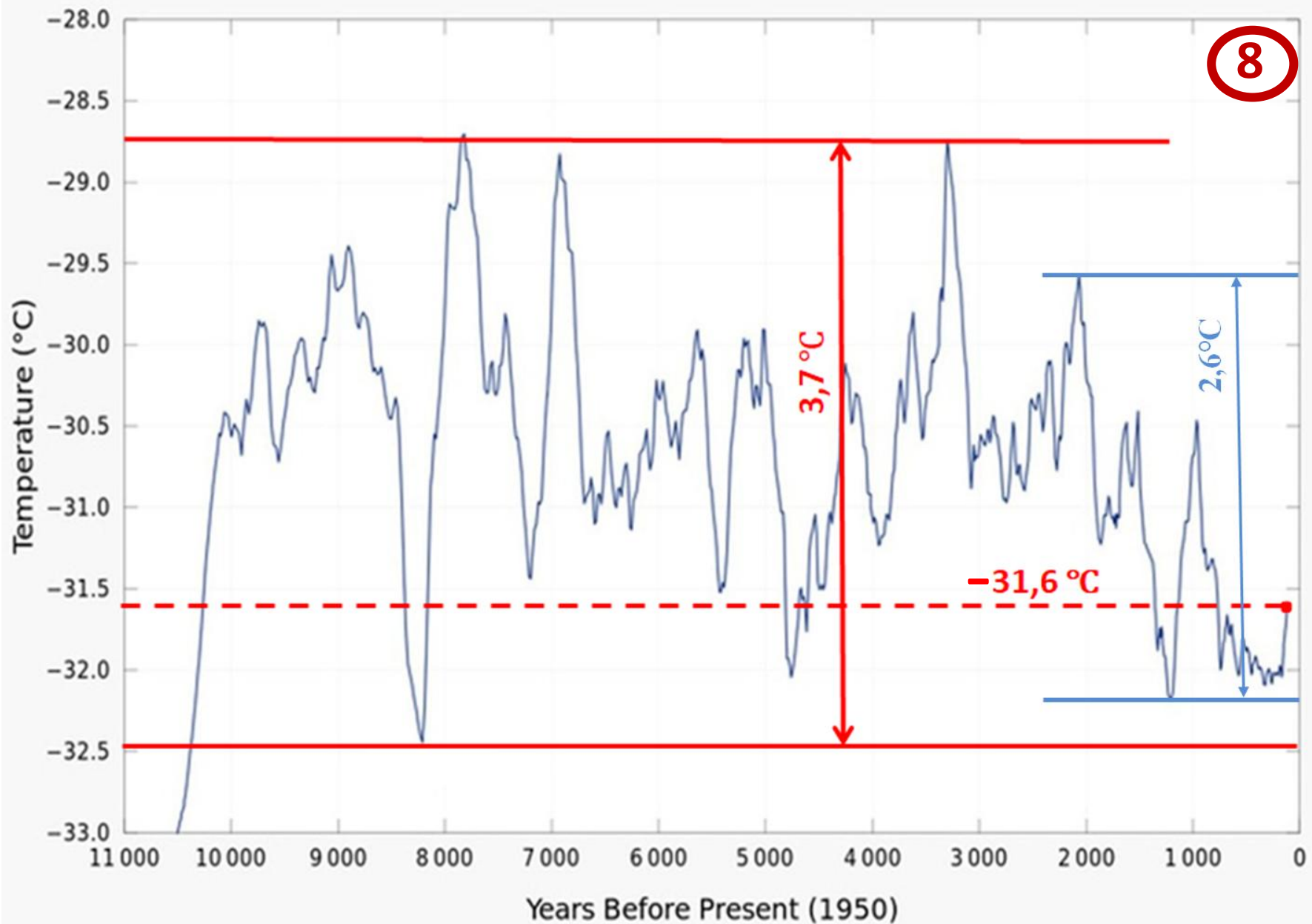
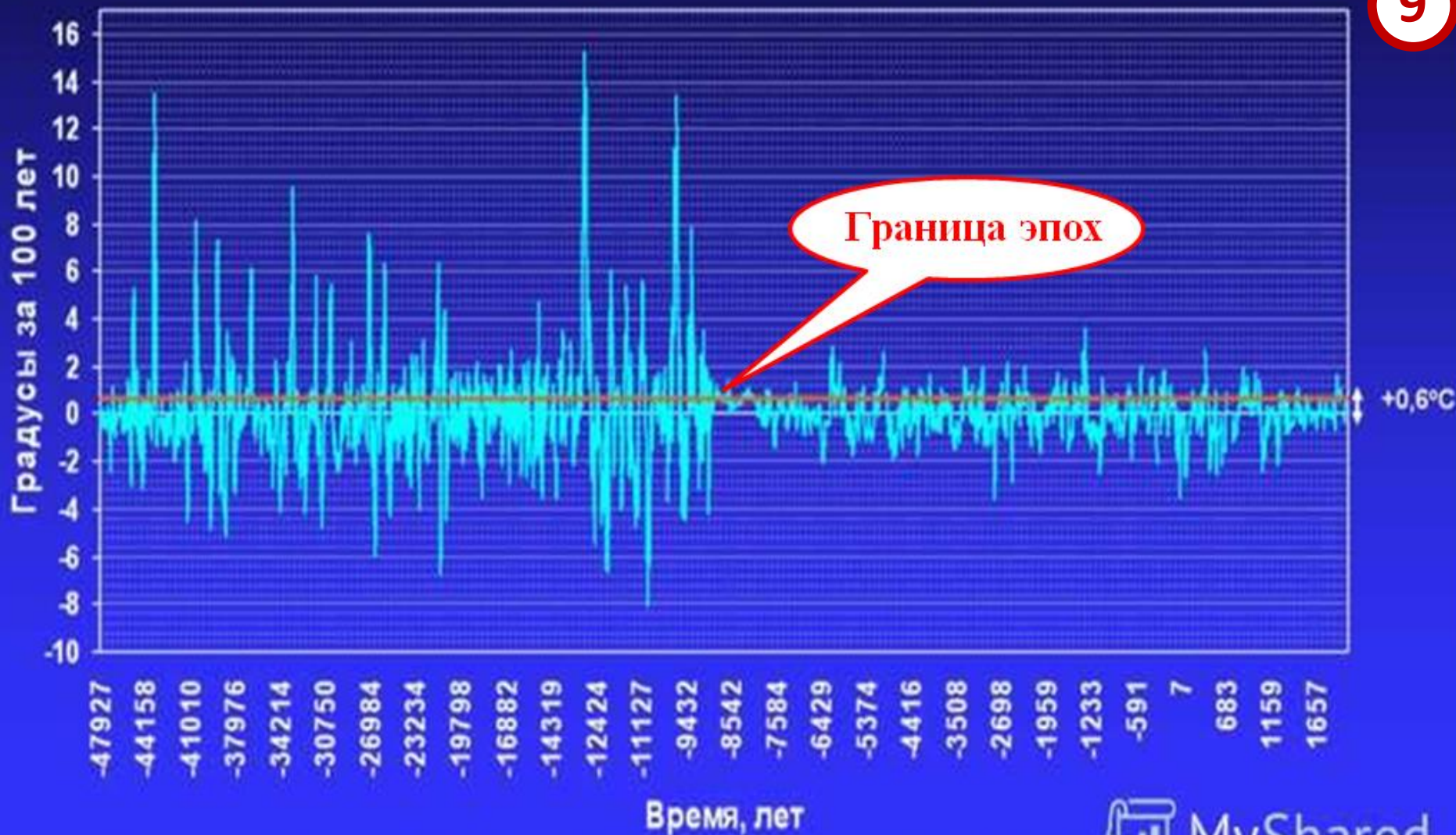


График среднегодовой температуры в Центральной Гренландии за последние 11 000 лет, построенный по данным ледового бурения.

Скорость изменения температуры (градусов С за 100 лет) в Центральной Гренландии за последние 50 тыс. лет.

9



Источник: NOAA, GISP2 Ice Core Temperature and Accumulation Data, Alley, R.V., 2004.

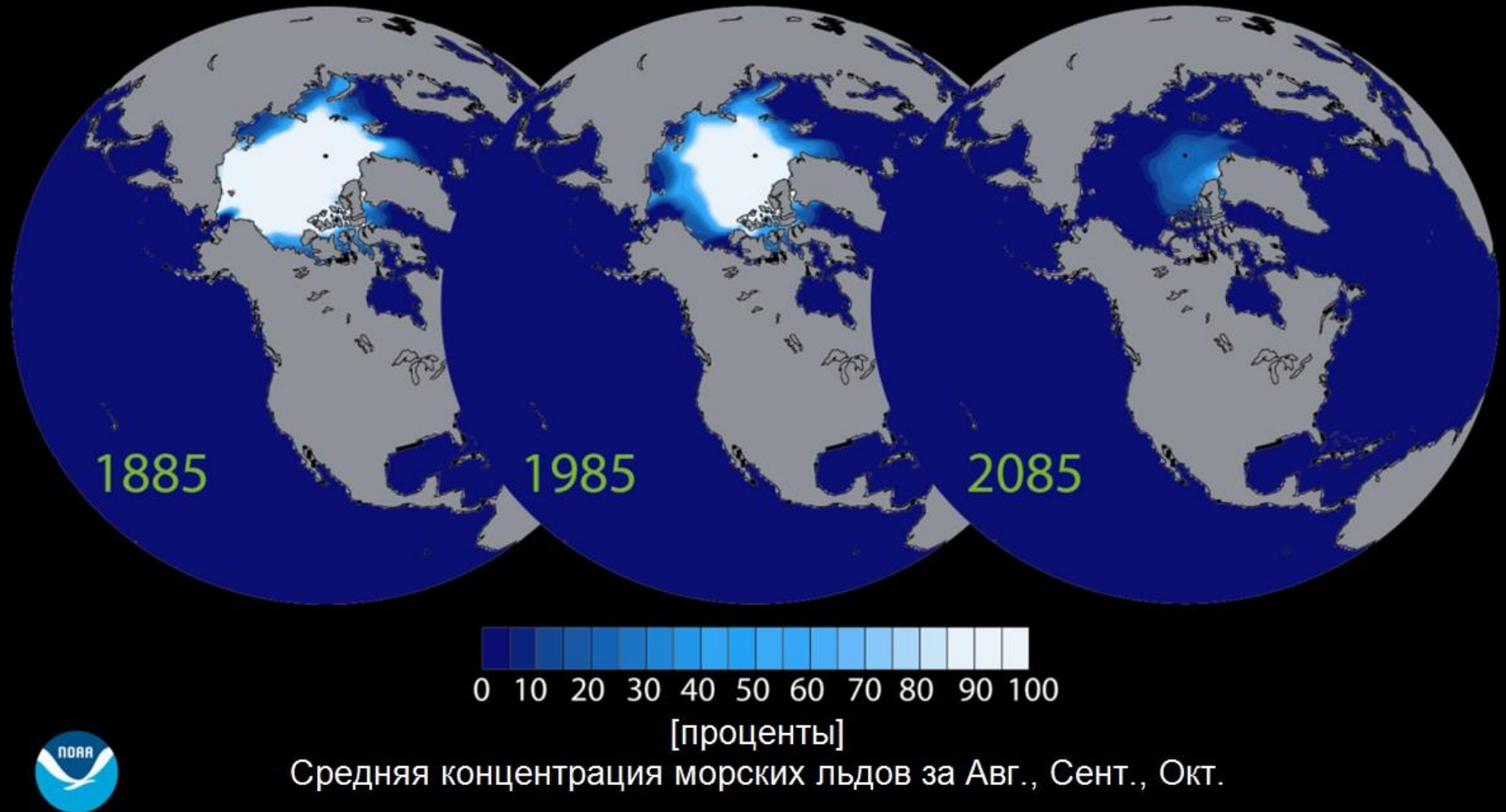
MyShared ©ИЭА

Скорость изменения температуры (°С за 100 лет) в Центральной Гренландии за

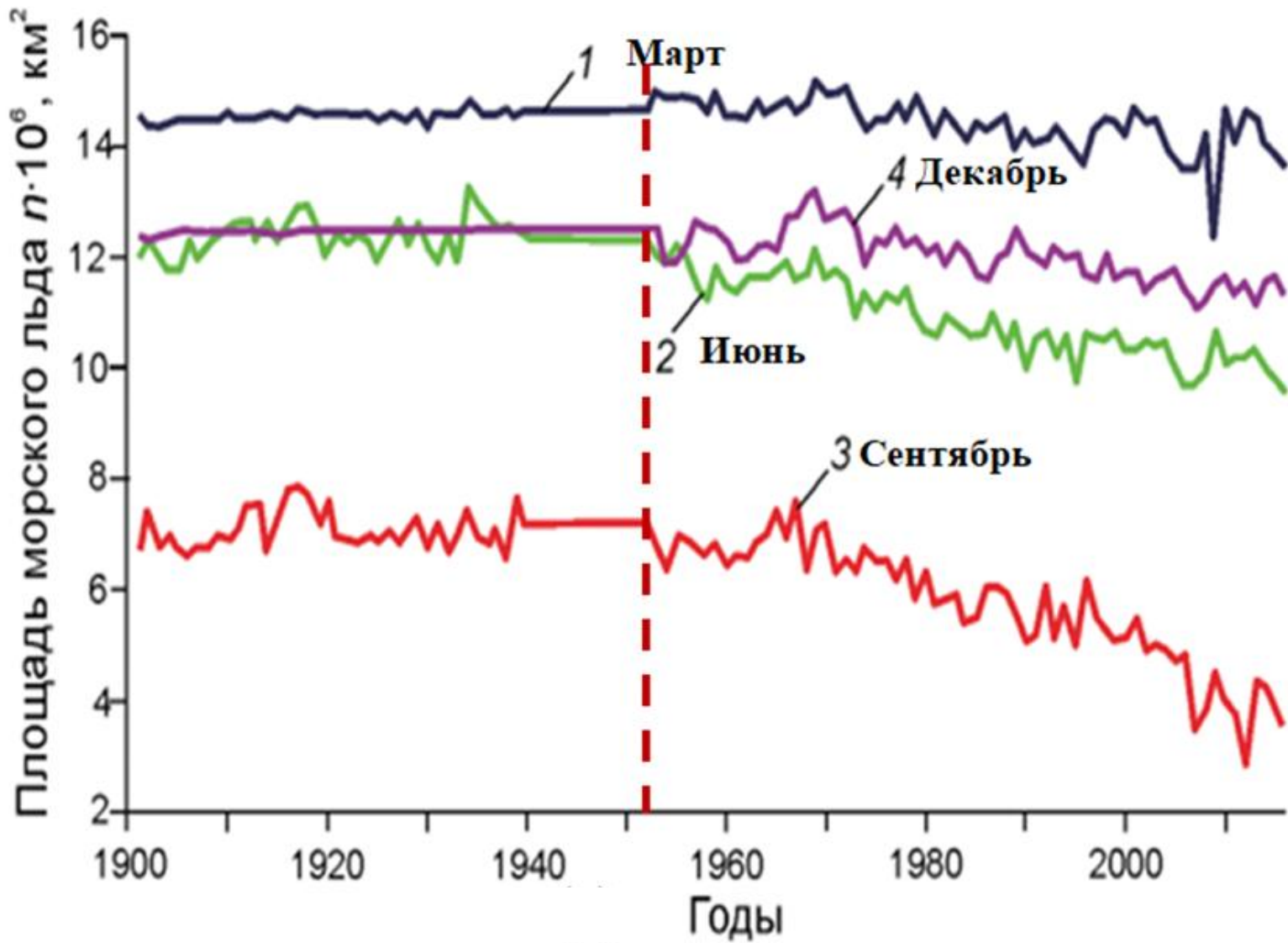
Уходящая в прошлое эпоха относительной климатической стабильности сформировалась в результате благоприятного для человечества стечения следующих обстоятельств:

- во время большого ледникового периода в полярных областях планеты скопились большие запасы льда;
- в результате высокой вулканической активности при выходе из оледенения в окрестностях полюсов Земли среднегодовые температуры повысились во время полярного дня до уровня, допускающего таяние льдов;
- циклическая смена полярных дней и ночей, сопровождавшаяся таянием и замерзанием больших масс льда и воды, превратила приполярные области планеты в огромные тепловые аккумуляторы;
- фазовые переходы, сопровождающие таяние и замерзание льдов, стабилизировали температуры в окрестностях полюсов Земли во время полярного дня на около нулевом уровне;
- стабильные температуры во время полярного дня стабилизировали начальные условия для тепловых процессов во время полярной ночи;
- среднегодовые температуры в приполярных областях стали стабильными;
- тепловые аккумуляторы Земли, участвуя в конвективном теплообмене, стабилизировали температуру проходящих через их территории воздушных масс;
- льды ограничивали по площади и по времени инсоляцию вод океана;
- уходящая климатическая эпоха уникальна по своим характеристикам в пределах 400 тыс. лет в прошлом, а ее повторение в будущем в пределах ближайших 100 тыс. лет представляется невероятным.

Климатическая модель NOAA GFDL CM2.1



Реконструкция прошлого и прогноз будущего состояния ледового покрова в районе Северного полюса

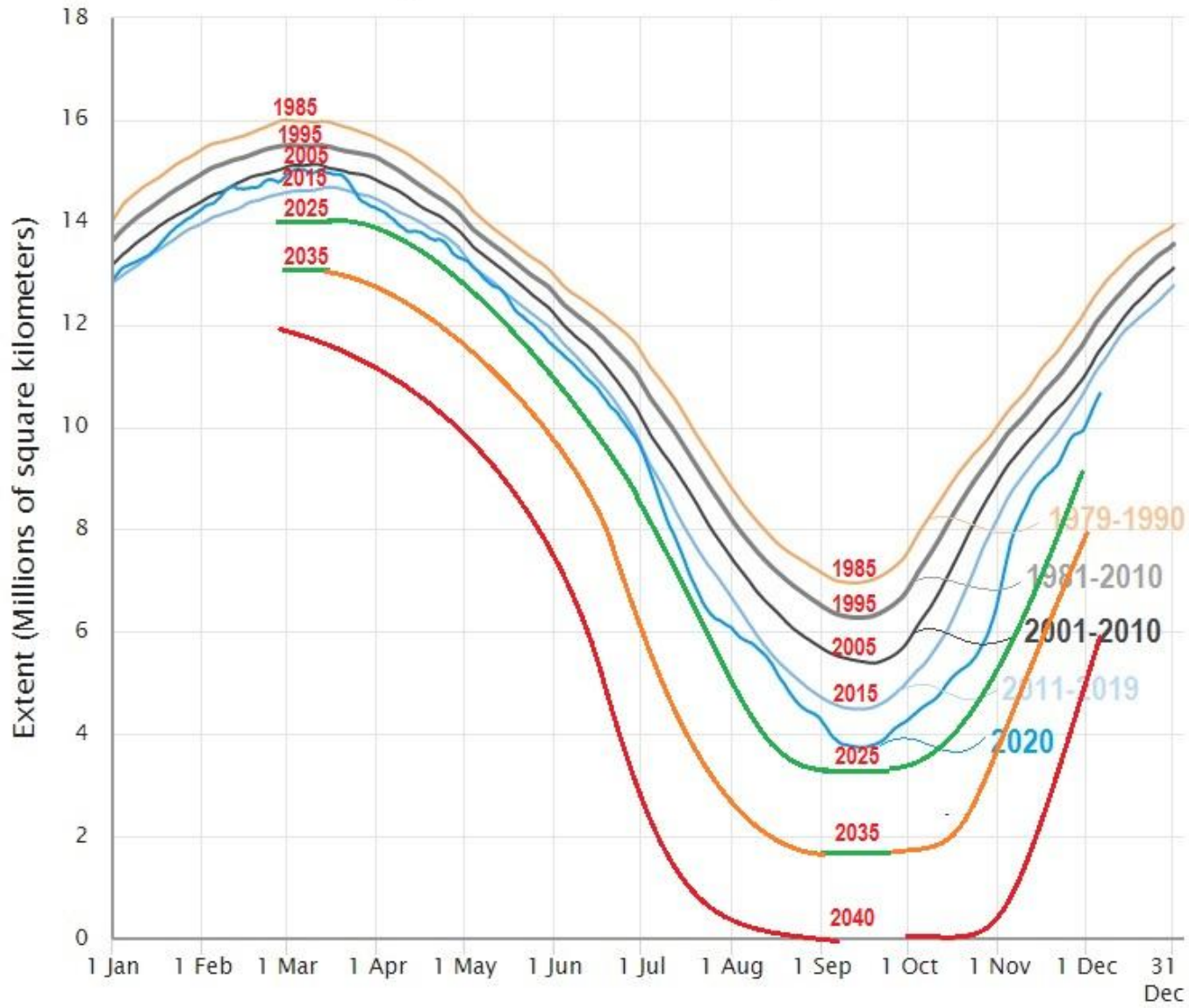


Площадь морского льда в Северном полушарии по данным архива Had ISST1 (Hadley Centre sea ice and sea surface temperature) за период с 1900 по 2016 годы

Arctic Sea Ice Extent



(Area of ocean with at least 15% sea ice)

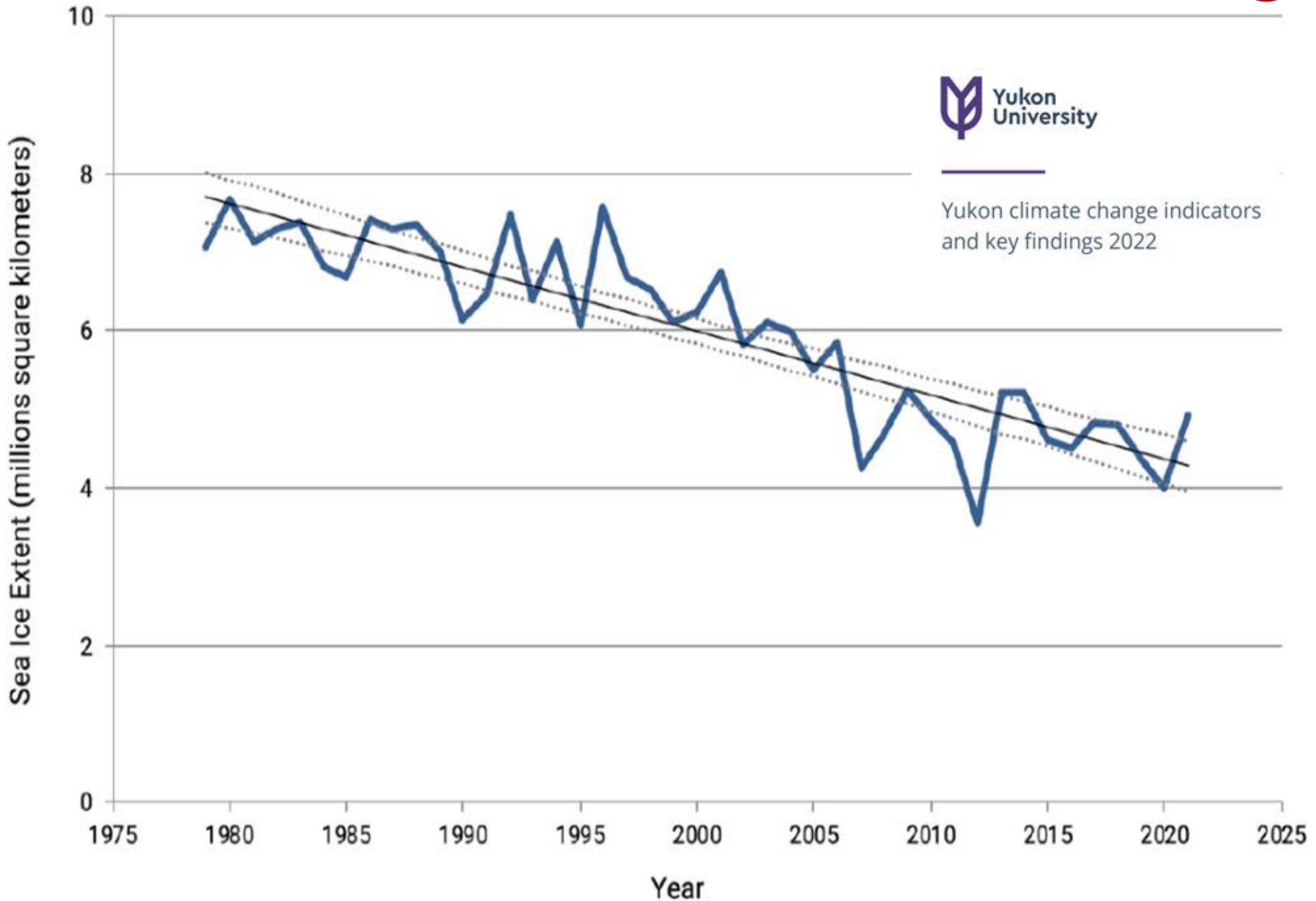


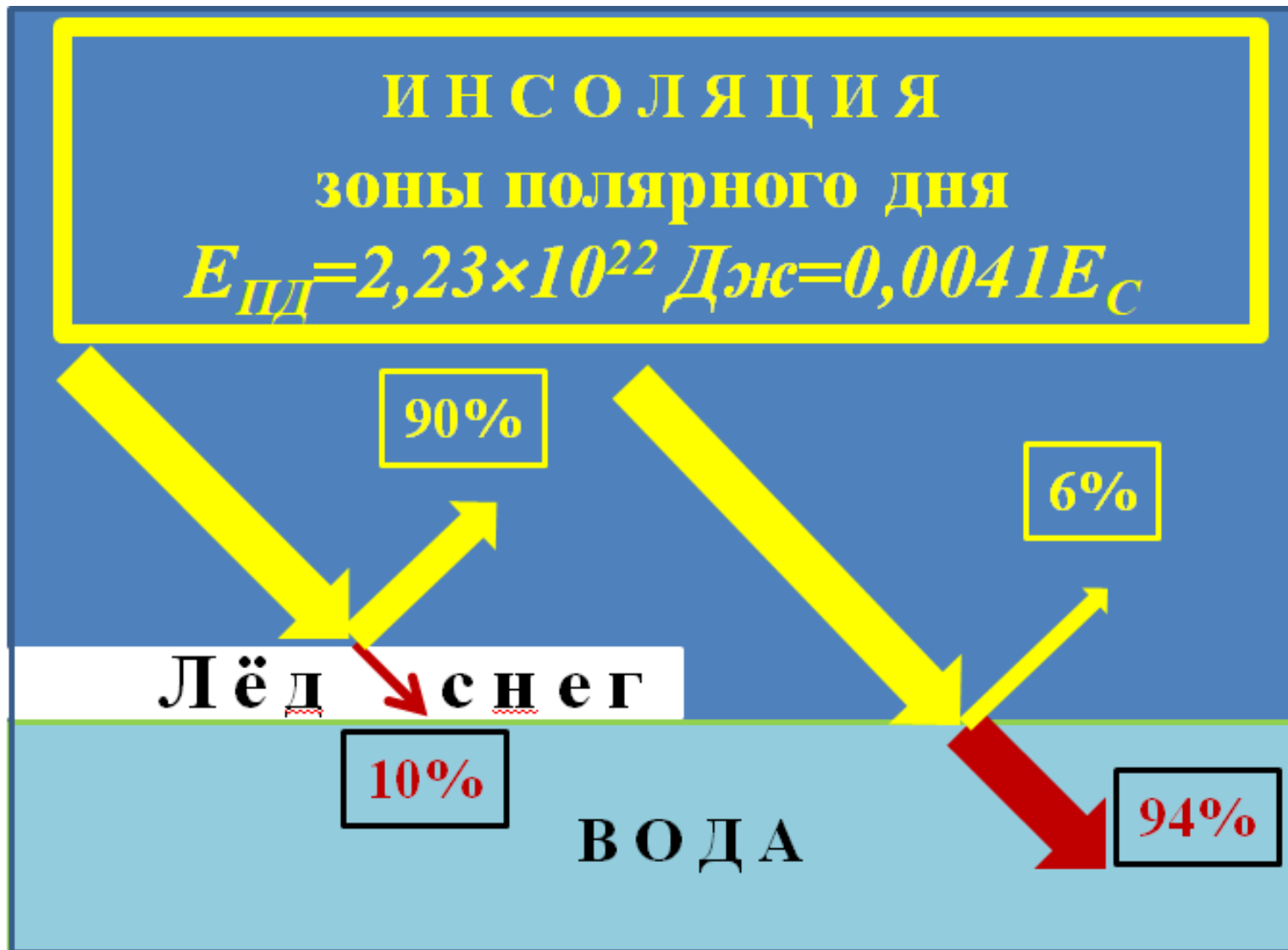
Площади арктических льдов по годам и месяцам по данным National Snow and Ice Data Center, USA.

Arctic September Sea Ice Volume Minimum



Arctic September Sea Ice Extent

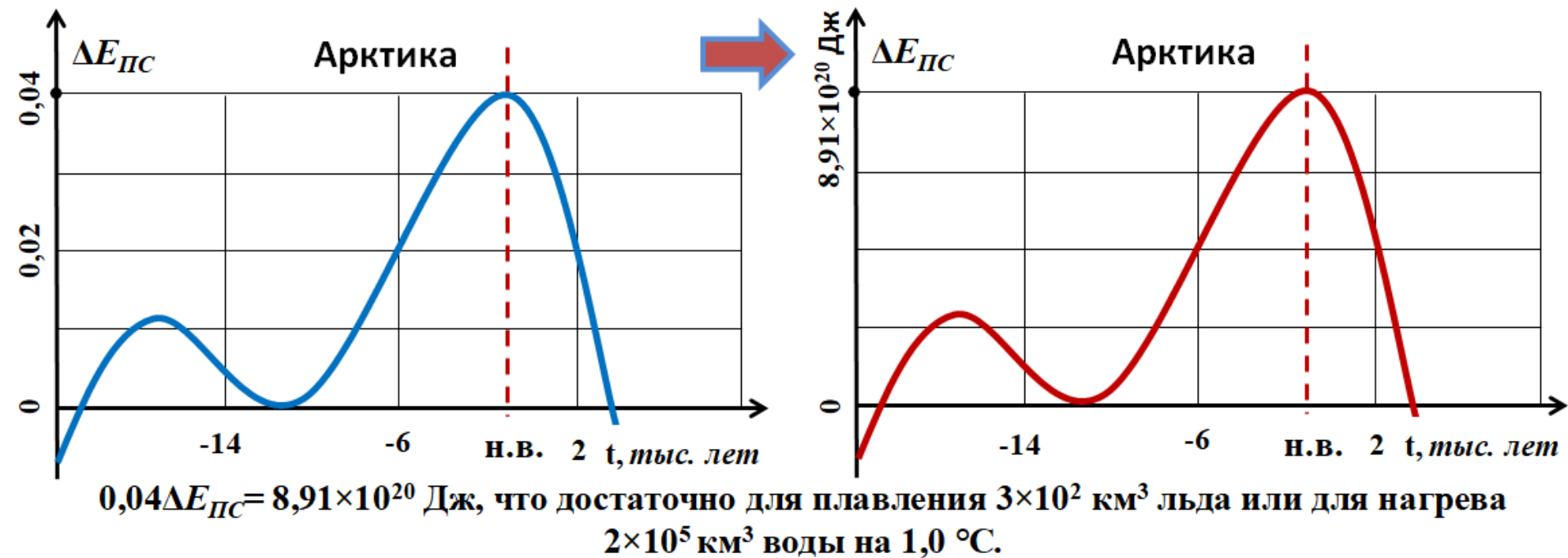




Для плавления 300 куб. км. льда с учетом его коэффициента отражения требуется $8,91 \cdot 10^{20}$ Дж. Такого объёма энергии достаточно для нагрева $2 \cdot 10^5$ км³ океанской воды на 1,0 °С.

Объем и площади льда и открытой воды в Северном Ледовитом океане в период с 1900 по 2045 годы.

Год	1900*	1945*	1980	2020	2045*
Объем льдов в марте, тыс. куб.км.	41,5	28,0	17,5	4,5	4,5
Площадь льдов в марте, млн.кв.км	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
Толщина льда в марте, м	2,86	1,93	1,2	0,45	0,45
Площадь льдов в сентябре, млн.кв. км.	7,5	7,5	6,0	4,5	2**
Площадь открытой воды в сентябре, млн.кв.км.	7,0	7,0	8,5	10,0	14,5
*Предположения авторов **Разрозненные остатки однолетних льдов					



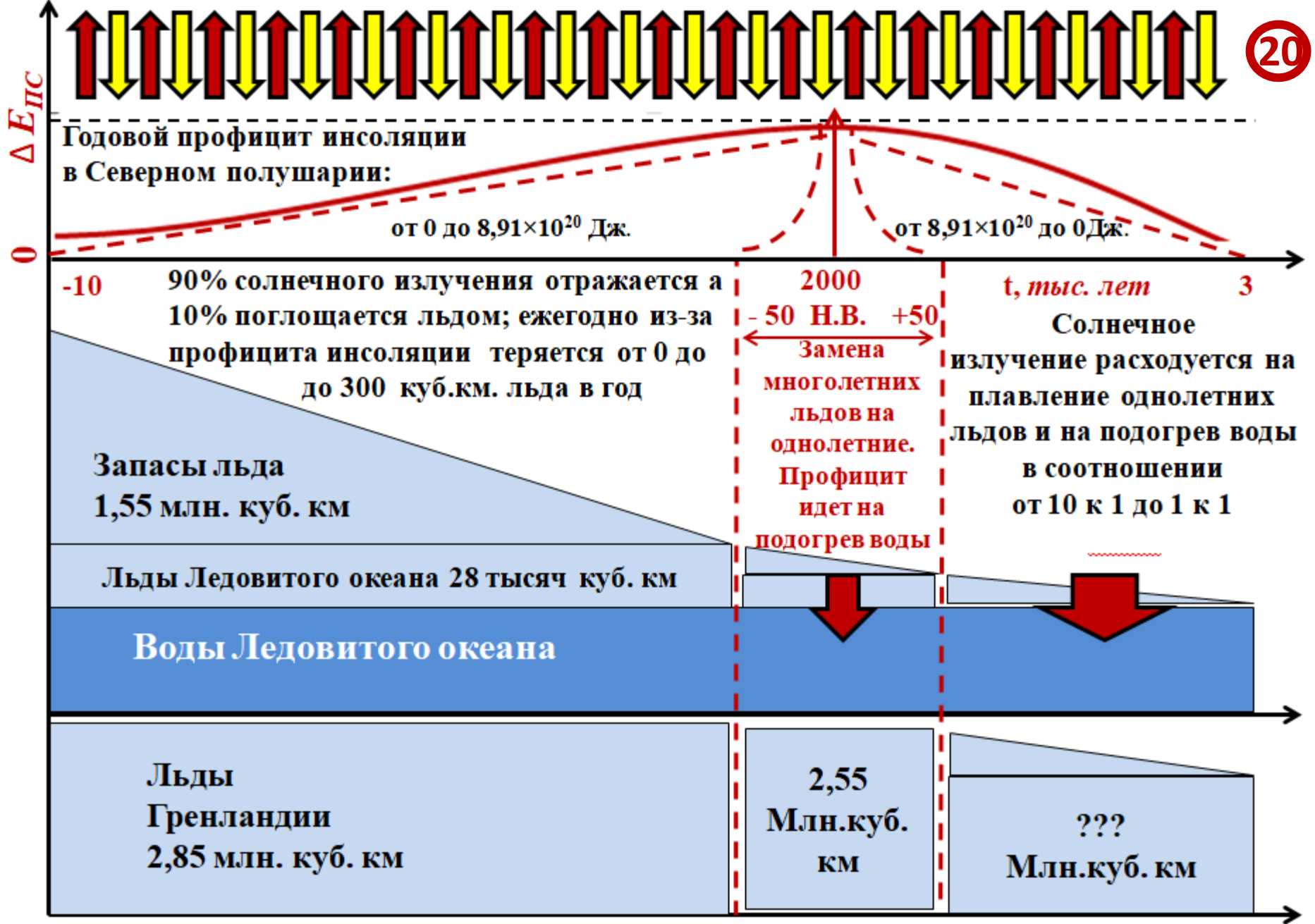
Абсолютизация астрономической модели инсоляции зон полярных суток Земли

Причина таяния льдов Арктики.

Около 10 тысяч лет тому назад в северной зоне полярных суток на основе естественных причин сформировался профицит солнечной энергии. Однако распространение потепления на прилегающие районы было блокировано тепловым аккумулятором. При этом ежегодно во время полярной ночи намораживалось меньше льда, чем таяло во время полярного дня. Когда запасы льда подошли к концу, началось потепление в прилегающих районах.

Среднегодовая инсоляция Земли, E_C , Дж	$E_C = 5,5 \cdot 10^{24}$		
Инсоляция зоны полярного дня, $E_{ПД}$ Дж	$E_{ПД} = 2,23 \times 10^{22} = 0,0041 E_C$		
Период времени	-10 тысяч лет	Наше время: -50 лет 2000 год +50 лет	+3 тысячи лет
Профицит инсоляции в зоне полярных суток, $\Delta E_{ПС}$, Дж/км ³ льда, в среднем	Растет от 0 до $8,91 \cdot 10^{20}$ / 150	$8,91 \cdot 10^{20}$ / 300	Падает от $8,91 \cdot 10^{20}$ до 0 / 150
Предполагаемые запасы льда на начало и на конец периода, км ³	$1,5 \cdot 10^6$ вначале; в конце $28 \cdot 10^3$	$28 \cdot 10^3$ Многолетние льды вначале; в конце $7,5 \cdot 10^3$ однолетние льды	$7,5 \cdot 10^3$ однолетние льды вначале; в конце???
Ежегодный расход энергии инсоляции на: плавление льда/подогрев воды,	100 / 0	100 / 4 – вначале 100 / 10 в конце	100 / 10 – вначале 1 / 1 через 15 – 25 лет в конце ???
Площади льдов в СЛО в марте, млн.км ²	14,5	14,5	14,5 – вначале; в конце ???
Площадь открытой воды в СЛО в сентябре, млн.км ²	7,5	7,5 вначале; в конце – 14,5	14,5
Объем ледников Гренландии, млн. км ³	2,85	2,55	???

↑ Собственное и отраженное излучение Земли Годовая инсоляция Земли $E_{ПС} = 2,23 \cdot 10^{22}$ Дж ↓



Последствия таяния льдов Арктики:

21

- Среднегодовая температура в северной зоне полярных суток перестанет быть стабильной.
- Начинается таяние вечной мерзлоты, что приведет к эмиссии больших объемов парниковых газов.
- Увеличение площади и времени существования открытой воды в Северном Ледовитом океане приведет к ее прогреву, что ускорит таяние ледников Гренландии.
- К 2050 году соотношение долей инсоляции, идущих на плавление льдов и на подогрев воды может уравниваться. Это значит, что к середине XX I века около половины годового объема инсоляции Арктики будет уходить на подогрев воды.
- Скорость таяния ледников Гренландии может оказаться высокой или очень высокой, до 3 – 5 тыс. км³ в год.
- Начнется подъем уровня мирового океана со скоростью до 1 м за 100 лет, что приведет к потере 5 -7% суши.
- Антарктика таять не будет. Наоборот, там в это время наступит дефицит инсоляции. Площадь оледенения начнет расти.

ГЕОИНЖЕНЕРНЫЕ СПОСОБЫ СОХРАНЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА 22

Методы	Возможность реализации до 2015 г.	Компенсация удвоения CO ₂ к 2050 г.	Наличие природных аналогов	Воздействие в пределах природных вариаций	Наличие негативных эффектов	Возможность быстрого прекращения
Отражатели в точке Лагранжа	Нереальна	Реальна	Нет	Нет	Неизвестно	Малореальна
Диспергаторы света в точке Лагранжа	Нереальна	Реальна	Нет	Нет	Неизвестно	Реальна
Отражатели на высоких орбитах	Нереальна	Реальна	Нет	Нет	Неизвестно	Нереальна
Стратосферные аэрозоли из металлов или их оксидов	Реальна	Реальна	Нет	Нет	Неизвестно	Реальна
Неполное сжигание топлива высотной авиацией	Реальна	Не более 30 % нужного эффекта	Нет	Нет	Весьма вероятно	Реальна
Стратосферные сульфатные аэрозоли	Реальна	Реальна	Да	Да	Маловероятно	Реальна
Газонаполненные шары в стратосфере	Реальна	Реальна	Нет	Нет	Весьма вероятно	Малореальна
Размещение отражателей на поверхности океанов	Нереальна	Весьма нереальна	Нет	Нет	Неизбежно	Реальна
Создание тумана над океаном	Малореальна	Весьма реальна	Да	Нет	Вероятно	Реальна
Создание облаков над океаном	Малореальна	Весьма нереальна	Да	Неизвестно	Весьма вероятно	Реальна
Разведение лесов	Реальна	Весьма нереальна	Да	Да	Нет	Нет
Стимулирование развития фитопланктона	Реальна	Не более 30 % нужного эффекта	Да	Нет	Вероятно	Реальна
Химическое поглощение CO ₂ из атмосферы	Нереальна	Весьма нереальна	Нет	Нет	Нет	Да

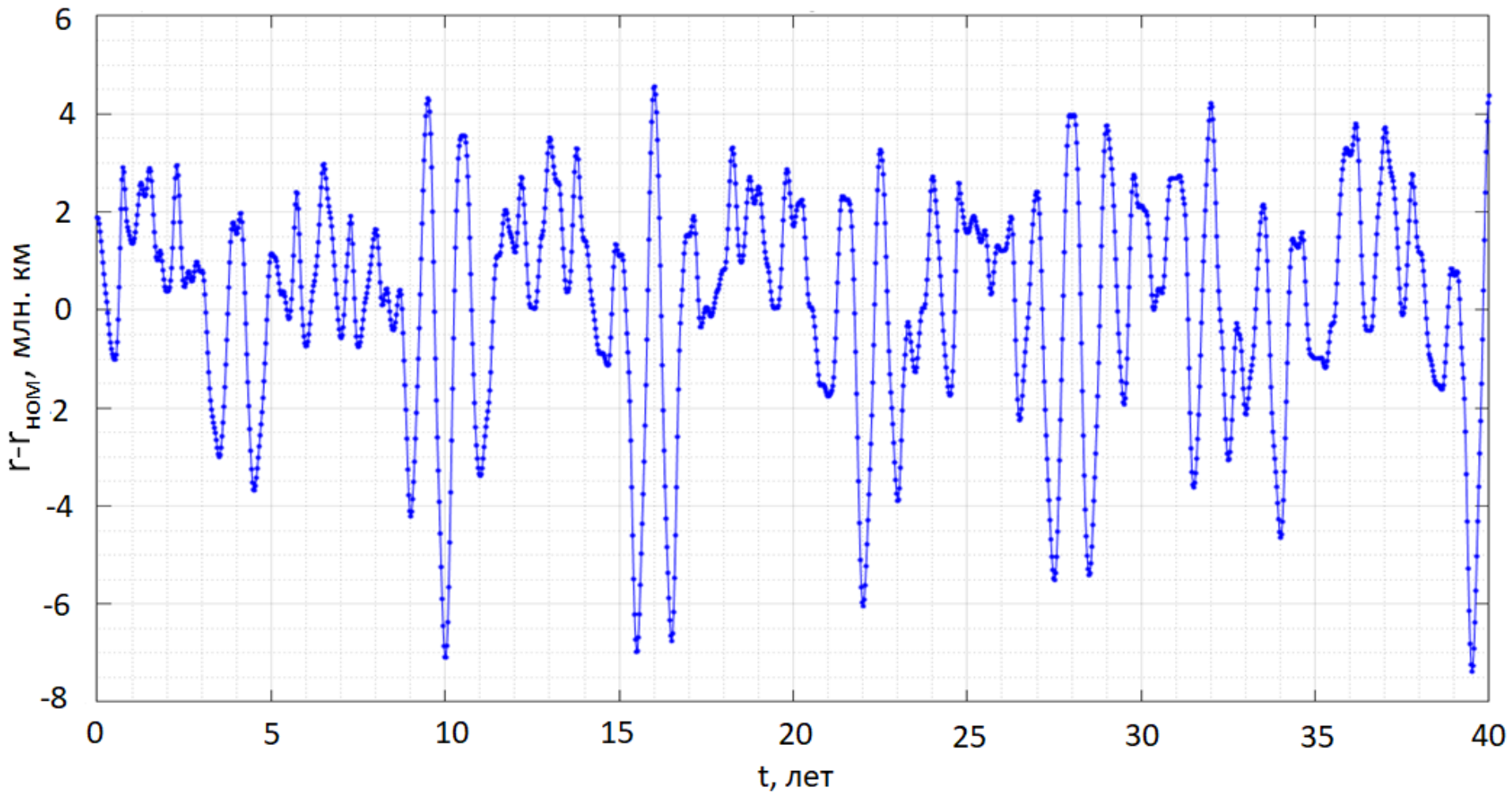
Израэль Ю.А., Рябошапка А.Г., Петров Н.Н. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата. Метеорология и гидрология 2009 № 6 с 5 – 24

Можно ли противостоять угрозе потепления?

- В середине ХХ века, когда еще не все запасы льда были израсходованы, чтобы остановить грядущее потепление было достаточно нейтрализовать профицит тепловой энергии в пределах территории Северного Ледовитого океана. Для этого было достаточно во время каждого полярного дня снижать пропускание земной атмосферы над океаном на ~4% для соответствующего уменьшения годовой инсоляции.
- Сегодня, когда уже начался прогрев вод Ледовитого океана, для того чтобы остановить процесс потепления потребуются снизить пропускание атмосферы на 7 – 10%.
- К 2050 году эти цифры вырастут еще больше, до 20 – 25%.
Далее, уже вряд ли что-то можно будет сделать.
- **Снизить пропускание атмосферы на ограниченное время можно с помощью авиации путем распыления капелек воды в верхних слоях атмосферы. С учетом того, что площадь Северного Ледовитого океана составляет менее 3% от площади земного шара, это вполне посильная, но очень не дешевая задача. Тем более, что эту процедуру придется повторять ежегодно на протяжении 3 тыс. лет...**

	Период, лет	Предельные значения
Эксцентриситет орбиты (e)	~ 100000	$0,077 - 0,003$
Наклонение земной оси (i)	41000	$22,1^{\circ} - 24,5^{\circ}$
Прецессия (p)	25920	$0 - 360^{\circ}$
Нутация (n)	18,6	$\pm 9,2''$

Основные переменные факторы внешнего влияния на климат Земли: эксцентриситет орбиты, наклон оси вращения планеты к плоскости эклиптики, прецессия, нутация.



Отклонение реального расстояния от Земли до Солнца относительно среднего эллипса орбиты на период от 2000 до 2040 гг.

Выводы по докладу

- **Сопоставление астрономической модели инсоляции арктической зоны полярных суток Земли с данными из истории климата и с результатами современных исследований динамики таяния льдов позволили выявить их глубинные причины, связанные с определенными сочетаниями астрономических факторов. Аналогичные причины в наше время подводят антарктические льды к замерзанию, которое затем продлится около 10 тыс. лет.**
- **Астрономическая модель инсоляции зон полярных суток Земли требует дальнейшего развития. Следует разработать аналогичные модели для других климатических зон планеты. В первую очередь для экваториальной зоны, где идет снижение контраста Между экваториальной зимой и летом, связанное с уменьшением эксцентриситета орбиты Земли. В конечном счете, модели должны быть объединены в одну общую, включающую в себя все значимые космические факторы. Можно ожидать, что в перспективе такая модель даст ключ к управлению климатом Земли.**
- **Проблему таяния ледников Арктики следует отделить от проблемы роста содержания CO₂ в атмосфере Земли поскольку они имеют разную физическую природу.**
- **Положение с таянием льдов Арктики следует признать катастрофическим, в связи с чем необходимо принятие важных научно обоснованных организационных и управленческих решений.**

Благодарю за внимание!
Как на самом деле будут развиваться события покажет
ВРЕМЯ!