

**ОПЫТ
СВЕРХДОЛГОСРОЧНОГО
ПРОГНОЗА КЛЮЧЕВЫХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК АРКТИКИ
НА БАЗЕ АСТРО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ПРЕДИКТОРОВ**

**Тимохов Л.А., Лис Н.А., Чернявская Е.А.,
ААНИИ**

ВВЕДЕНИЕ

- *Масштабы и скорость изменения климата в Арктике в последние десятилетия вызывают большую обеспокоенность научной общественности.*
- **Ни одна термогидродинамическая (климатическая) модель не смогла предсказать экстремальное уменьшение летней площади льдов арктических морей в 2012 г.**
- *Поэтому особенно возросла актуальность исследований и описания долговременных гидрометеорологических процессов не только путем улучшения гидродинамических моделей, но и эмпирическим путем.*

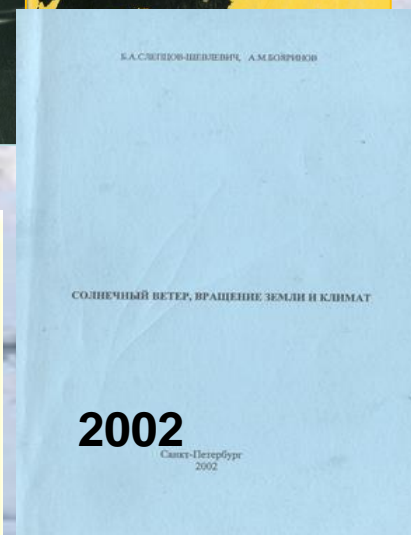
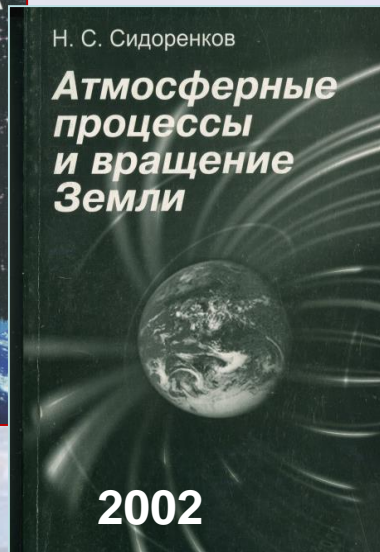
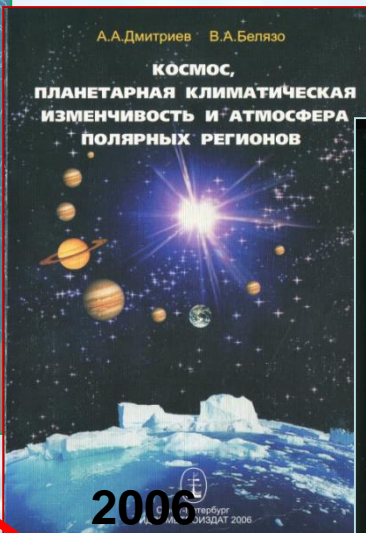
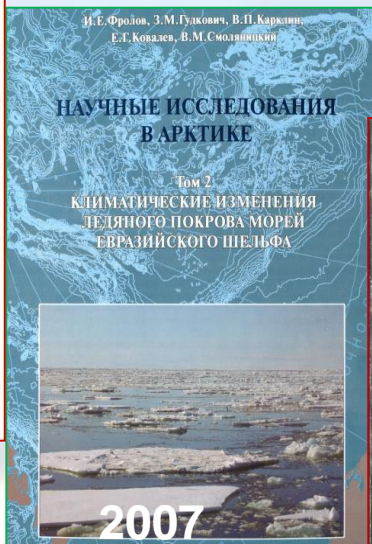
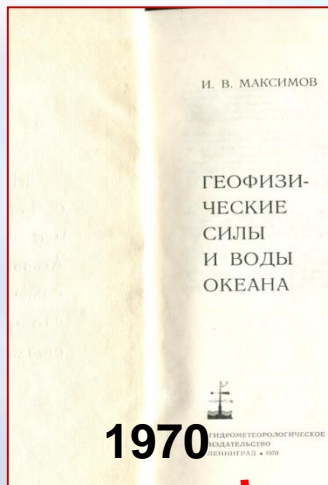
*Авторы использовали эмпирический метод получения статистических моделей долговременной (межгодовой и внутривековой) изменчивости состояния атмосферы, океана и ледяного покрова в Арктике **НА БАЗЕ АСТРО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРЕДИКТОРОВ.***

- *Почему астро-геофизические факторы?*

Из истории:

А.И. Воейков: На климат и его изменчивость в основном влияет перемещение воздушных масс в результате влияния Солнца.

В.В. Шулейкин: Как бы ни были разнообразны и разнохарактерны периодические движения, возникающие в водах мирового океана, корни их кроются обычно в одном и том же: лучистой энергии Солнца.



Опыты прогнозов

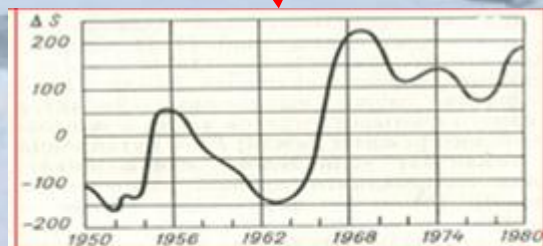


Рис. 144. Долгосрочный прогноз общей ледовитости Баренцева моря, составленный в 1954 г. И. В. Максимовым компонентно-гармоническим методом.
 ΔS — аномалии площади моря, вскрытой льдом, в тысячах квадратных километров.

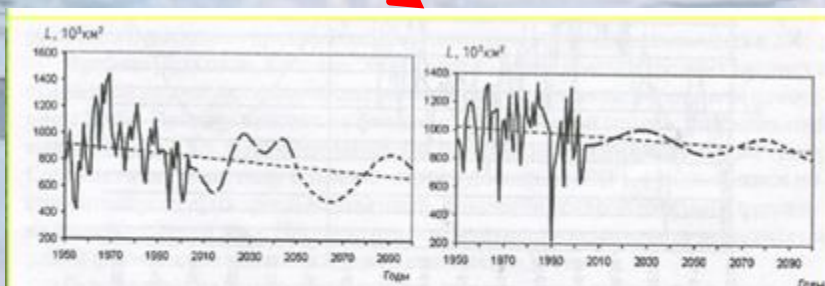


Рис. 6.2. Прогноз климатических изменений суммарной площади распространения льда в западных (а) и восточных (б) арктических морях на XXI в. с учетом линейного тренда во второй половине XX в.

АВТОРСКОЙ КОНЦЕПЦИЕЙ

описания долговременных (межгодовых, внутривековых) изменений характеристик и индексов атмосферы, океана и ледяного покрова Арктики **является положение о**

преимущественном влиянии на них

астро-геофизических факторов и

ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ СТАТИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ

Астро-геофизические факторы состоят из двух групп различной природы:

1. Силы гравитационной природы:

приливообразующие силы Луны и Солнца, гравитация планет, изменение скорости вращения Земли, нутация оси вращения Земли и изменение ее наклона оси к эклиптики



2. Радиация и электромагнитное излучение: солнечная радиация, космическое излучение;



Технология исследования и разработка статистических моделей долговременной изменчивости

1. Анализ статистической структуры:

- Установление структуры межгодовой и климатической изменчивости;
- Расчет трендов и инерционности;
- Вычисление спектров межгодовых и климатических колебаний;
- Оценка вклада циклических колебаний в общую дисперсию изменчивости предиктора.

2. Исследование сопряженности:

- Построение графиков связи исследуемых характеристик с гидрометеорологическими и астрогеофизическими параметрами;
- Расчет парных корреляций и кросскорреляционный анализ связи предиктантов с предикторами;
- Установление механизмов воздействия отдельного гидрометеорологического и астрогеофизического фактора на долгопериодную изменчивость предиктантов.

3. Разработка статистических моделей:

- Расчеты множественной корреляция между предиктантами и предикторами, построение матриц множественной корреляции; проверка на качество;
- Выполнение мульти-регрессионного анализа и получение статистических уравнений связи предиктантов с предикторами.

МУЛЬТИ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ (по программам «Статистика»)

Вначале строилась полная модель предиктанта Y с использованием всех предикторов

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$$

Затем из нее исключались наименее значимые предикторы X_i по критерию p -level. Далее процедура продолжалась до получения наиболее статистически значимых переменных.

АСТРО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (ПРЕДИКТОРЫ), ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ИССЛЕДОВАНИИ



**Астрономические характеристики
(предикторы)**

Предикторы



**Геофизические характеристики
(предикторы)**

D_S и D_W расстояние от Солнца до Земли в летнее (апрель–сентябрь) и зимнее (октябрь–март) полугодия. <https://soft-ok.net/226-astroprocessor-zet-9-lite.html>

F_{Ur} - аномалия силы притяжения между Землей и планетой Уран.

Q - Годовой приход солнечной радиации Q на верхнюю границу атмосферы Земли в полярной зоне, связанной с небесно-механическими процессами

dQ - градиент инсоляции (инсоляционная контрастность),

J_s - суммарный момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы;

SA - величина солнечной активности (число Вольфа) https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt ;

$dSA = SA(0) - SA(-10)$ разность поступающей от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы.

X, Y - вариации среднегодовых координат полюса Земли.

<ftp://hpiers.obspm.fr/iers/series/opa/eopc04>

$dEps$ и $dPsi$ - параметры нутации оси Земли.

lod (length of day) - величина флуктуации продолжительности суток.

<https://astro.ukho.gov.uk>

База данных содержит более 80 временных рядов среднегодовых предикторов с 1900 по 2023 гг.

1. ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

T_z - В ШИРОТНОЙ ЗОНЕ 70-85° С.Ш. И

T_s - НА АКВАТОРИИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

$$T_z = 0,42 \cdot dQ(0) - 0,55 \cdot lod(0) + 0,40 \cdot Js(-27) - 0,15 \cdot dSA(-6); \quad (1)$$

$$T_s = 0,24 \cdot dQ(0) - 0,77 \cdot lod(0) + 0,20 \cdot Js(-27) - 0,13 \cdot dSA(-9). \quad (2)$$

T_z: R = 0,891;

T_s: R=0,88;

R² = 0,80;

R²=0,78;

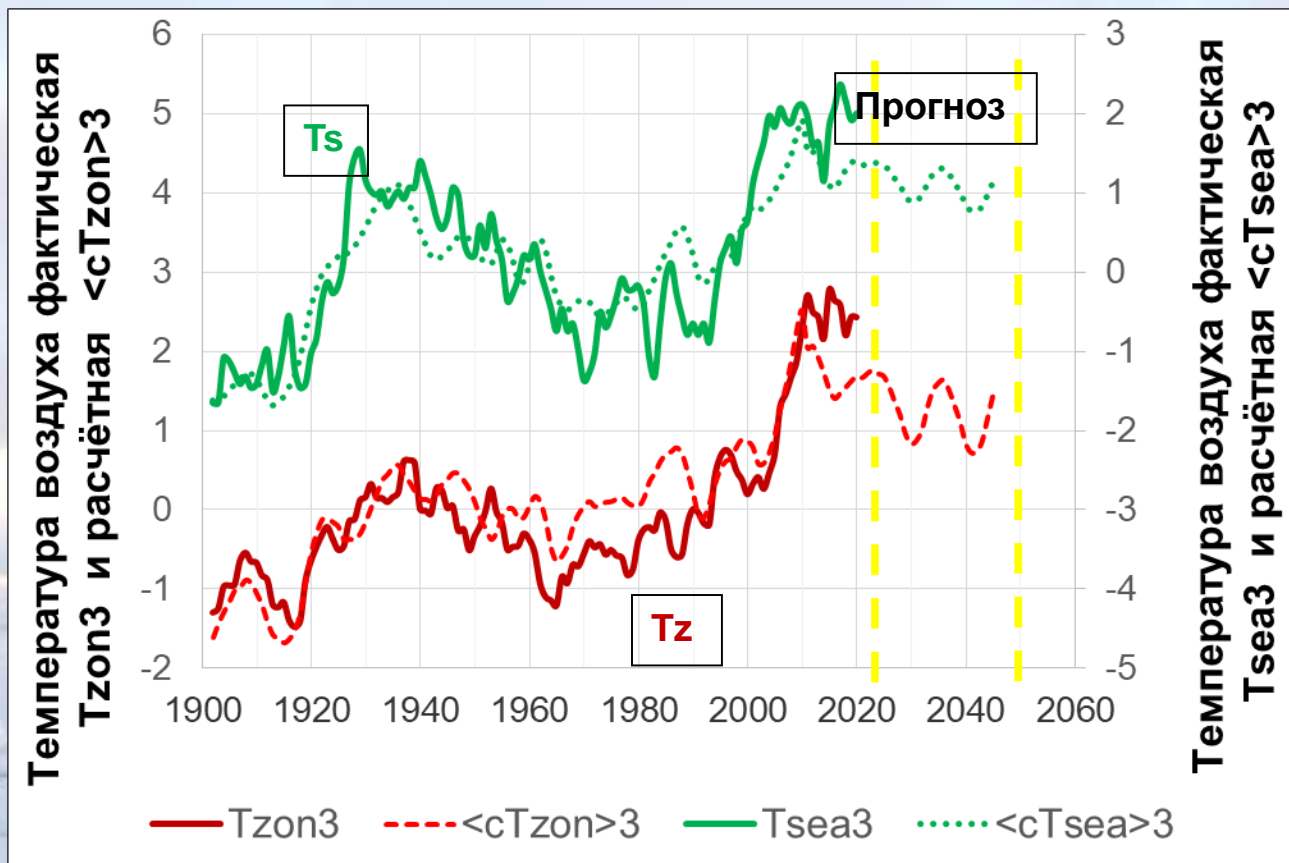
Уравнение (1)	Вклад, %	Уравнение (2)	Вклад, %
dQ(0)	28	dQ(0)	12
lod(0)	30	lod(0)	60
Js(-27)	17	Js(-27)	3
dSA(-6)	5	dSA(-9)	3



Астро-геофизические факторы (предикторы):

- dQ - градиент инсоляции (инсоляционная контрастность),
- lod(-1) - продолжительность суток;
- Js(-27) - суммарный момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы;
- dSA= SA(0)-SA(-10) разность поступающей от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы.
- в скобках при предикторах указаны временные лаги в годах

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В АРКТИКЕ



Результат предвычисления: температура воздуха в арктической зоне зоне 70-85° с.ш. к 2040 г. будет понижаться, сохраняя небольшие межгодовые вариации, с минимумом около 2030 г. и максимумом около 2035-2036 гг.; затем ожидается понижение температуры к 2040 г. Но возврата к климату XX века не ожидается.

2. ФОРМЫ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ В АРКТИКЕ: западная (W), восточная (E) и меридиональная (C)

$$W=0,88F_{Ur}(-44)-0,16Js(-23)+0,29dSA(-8)-0,19dlod(-2)-0,16lod(-24)-0,13SA(-21); \quad (3)$$

$$E=-1,16F_{Ur}(-43)-0,48Js(-8)+0,34dQ(-13)-0,34\Delta SA(-8)-0,39dlod(-7)+0,52lod(-23)+0,26SA(-21); \quad (4)$$

$$C=0,45F_{Ur}(-28)-0,37Js(-18)-0,27dQ(-13)-0,90lod(-12)+0,32*dlod(-1)+0,002SA(-6). \quad (5)$$

W: уравнение (3)		E: уравнение (4)		C: уравнение (5)	
R = 0,90; R ² = 0,81;		R = 0,89; R ² = 0,79;		R=0,80; R ² = 0,64;	
Параметры	Вклад, %	Параметры	Вклад, %	Параметры	Вклад, %
F _{Ur} (-44)	65	F _{Ur} (-43)	46	F _{Ur} (-28)	10
Js(-23)	2	Js(-8)	8	Js _y (-18)	7
dSA(-8)	7	dSA(-8)	4	dQ(-13)	3
SA(-21)	1	SA(-21)	2	SA(-6)	0,002
dlod(-2)	3	dlod(-7)	5	dlod(-1)	5
lod(-24)	2	dQ(-13)	4	lod(-12)	39
		lod(-23)	9		

Астрогеофизические факторы:

dQ - градиент инсоляции (инсоляционная контрастность),

lod - продолжительность суток;

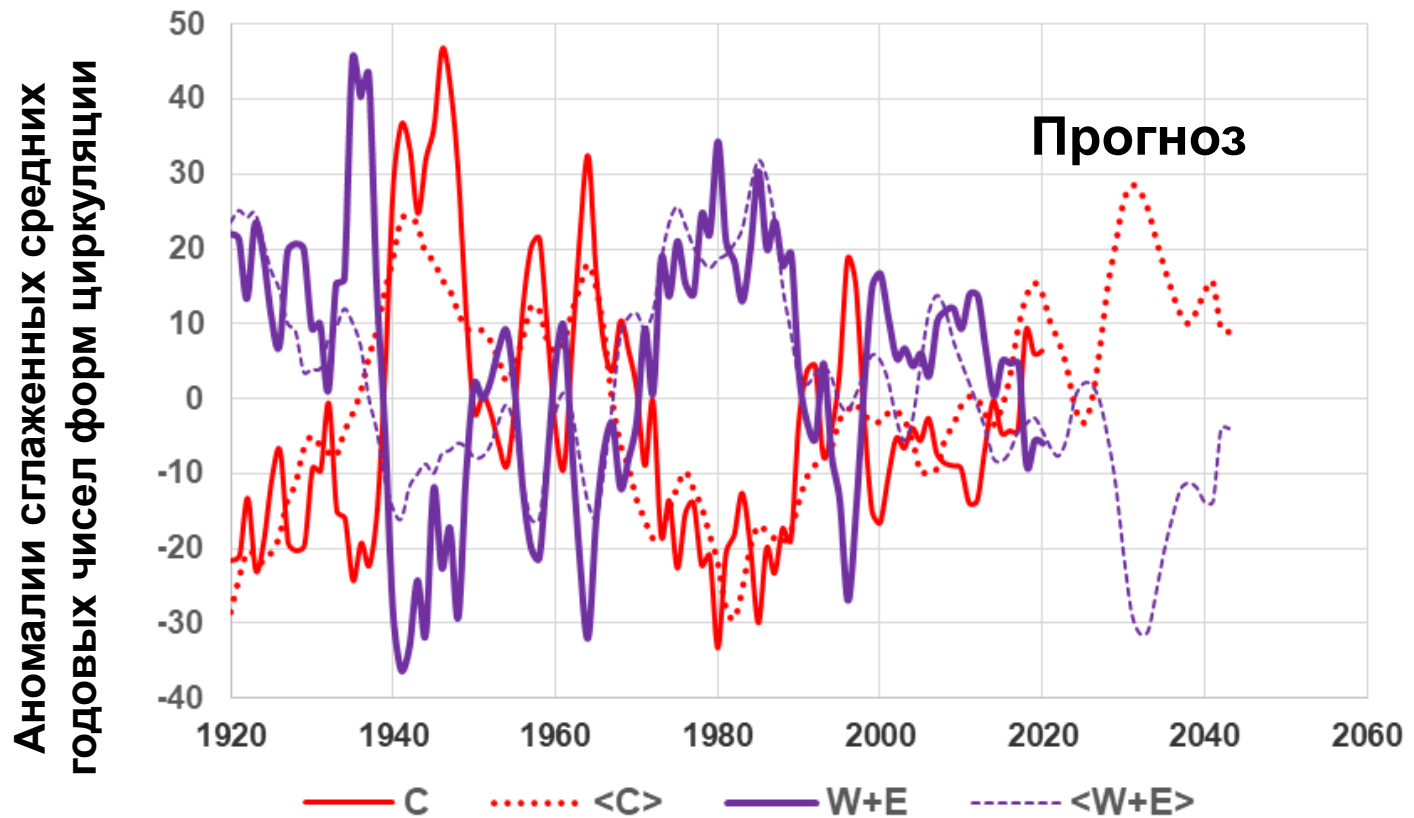
dlod-изменение продолжительности суток (ускорение/замедление вращения Земли)

Js -суммарный момент инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы;

dSA= SA(0)-SA(-10) разность поступающей от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы;

F_{Ur}- аномалия силы притяжения между Землей и планетой Уран.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЯ ФОРМ ЦИРКУЛЯЦИИ “С, W+E” В АРКТИКЕ

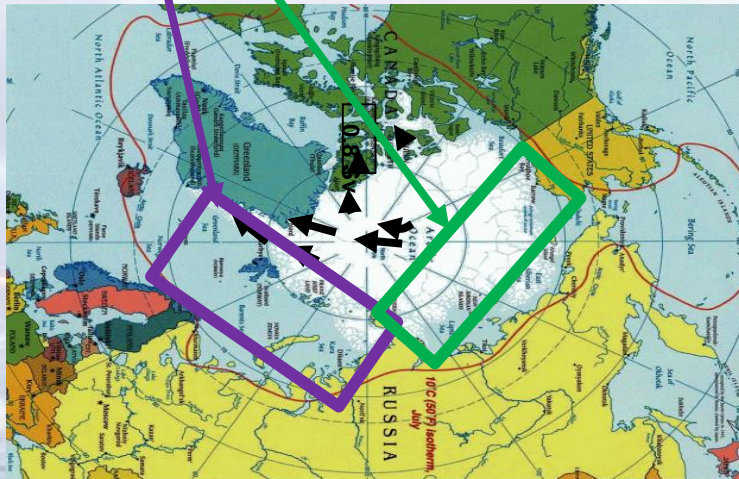


**Результат предвычисления форм циркуляции атмосферы:
период 2020-2043 гг. предполагается подобным прошлому периоду
1968-1992 гг.**

3. ЛЕДОВИТОСТЬ В АВГУСТЕ ЗАПАДНЫХ Lw И ВОСТОЧНЫХ Le АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

$$Lw = 21505 \cdot dEps(0) + 95 \cdot lod(-1) - 0,9 \cdot SA(-4) + 739; \quad (7)$$

$$Le = -2929 \cdot dX(-1) + 199 \cdot dDs(-2) + 0,76 \cdot SA(-5) + 314. \quad (8)$$



Lw;			Le;		
R=0,85; R ² =0,72;			R=0,78; R ² =0,60;		
	Уравнение (7)	Вклад, %		Уравнение (8)	Вклад, %
1	dEps(0)	52	1	dX(-1)	49
2	lod(-1)	17	2	dDs(-2)	7
3	SA(-4)	3	3	SA(-5)	4

Астрогеофизические факторы:

dEps - угловой индекс наклона оси Земли;

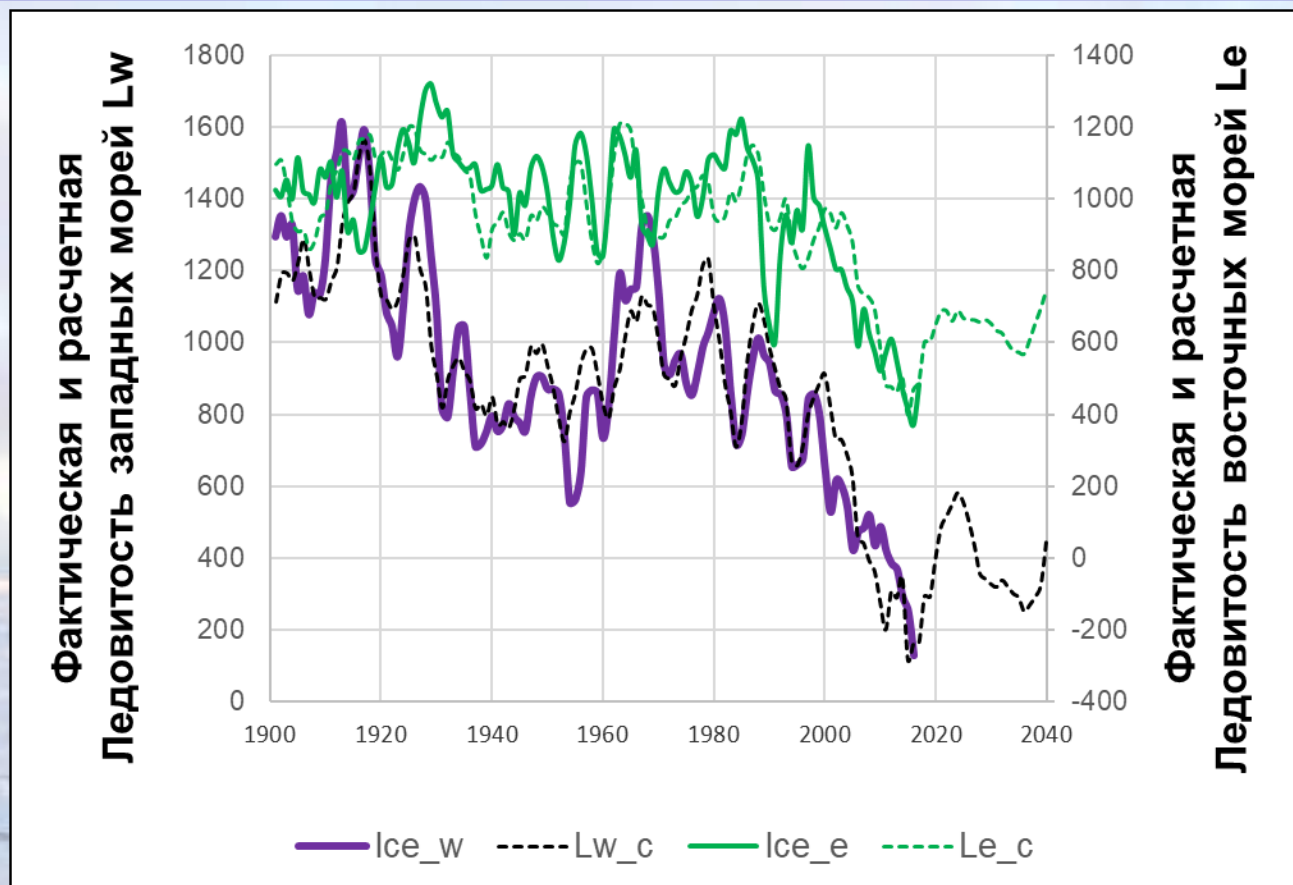
lod - продолжительностью суток;

SA -солнечная активность (числа Вольфа);

dX – вариации X-координаты полюса Земли;

dDs - нормированные отклонения расстояния от Земли до Солнца в летний период.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЯ ЛЕДОВИТОСТИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ



Результат предвычисления: будет наблюдаться уменьшение ледовитости в западных и восточных арктических морях к 2033-2035 гг. и увеличение ледовитости к 2040 г.; но увеличение ледовитости в 2030-2040 гг., вероятно, не достигнет уровня тяжелой ледовитости 1970х., сохранившись на уровне 2000-2010 гг.

Итог:

Разработаны статистические модели долговременных колебаний температуры воздуха, форм циркуляции атмосферы и ледовитости в Арктике и выполнен сверхдолгосрочный прогноз на 5-20 лет:

- Температура воздуха в Арктике по расчетам на период 2021 – 2043 гг. демонстрируют слабый отрицательный тренд температуры, на фоне которого будут наблюдаться циклические колебания с периодом 10 – 15 лет с максимумом около 2036 гг. и минимумом около 2030 и 2041 гг. Пределы изменения температуры предполагаются аналогичными периоду 2000–2020 гг. Но возврата к климату XX века не ожидается.
- Изменения форм циркуляции атмосферы демонстрирует увеличение числа формы циркуляции E, как это наблюдалось в прошлом в 1950 – 1960-х годах. Этот период характеризовался переходом от потепления 1940-х к более холодному периоду 1970-х. Для форм C и W+E циркуляции атмосферы период 2020 – 2043 гг. предполагает быть подобным прошлому периоду 1968 – 1992 гг., который характеризовался похолоданием.
- Будет наблюдаться уменьшение ледовитости в западных и восточных арктических морях к 2033-2035 гг. и увеличение ледовитости к 2040 г.; но увеличение ледовитости в 2030-2040 гг., вероятно, не достигнет уровня тяжелой ледовитости 1970х., сохранившись на уровне 2000-2010 гг.

Результат согласуется с оценками

- *Федоров В.М. “Солнечная радиация и климат Земли. 2018”*: минимальные значения приповерхностной температуры для северного полушария приходятся на 2023 г., а максимальные – на 2035 г. и 2050 г.
- *Шерстюков Б.Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. 2021*: к 2040 г. температура Северного полушария вернется к состоянию 2000-2015 гг. и наступит стабилизация климата.
- *Дмитриев А.А., Беязо В.А., Гудошников Ю.П. Ритмические колебания земных природных процессов и их гравитационная обусловленность. СПб(2011)*: до 2050 г. минимум температуры воздуха приходится на 2025 и 2045 гг., а максимумы – на 2020 и 2035 гг.
- И др.

Заключение

- **Мульти-регрессионным методом получены статистические модели долговременных изменений ряда характеристик состояния Арктики;**
- **Наш подход является новой парадигмой методологии комплексного описания многолетних колебаний состояния Арктики, и может служить хорошим основанием для развития методов сверхдолгосрочного прогноза характеристик климатического состояния Арктики.**

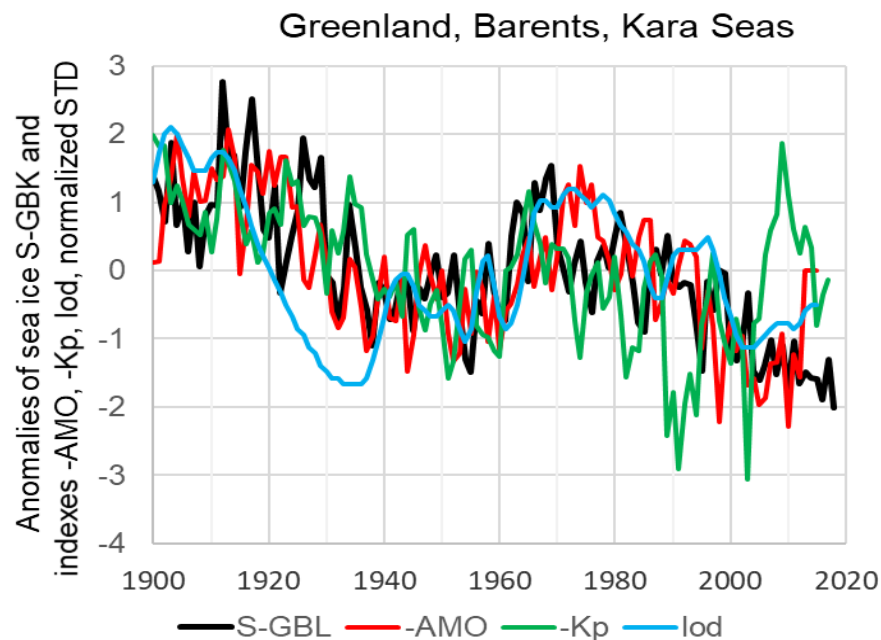
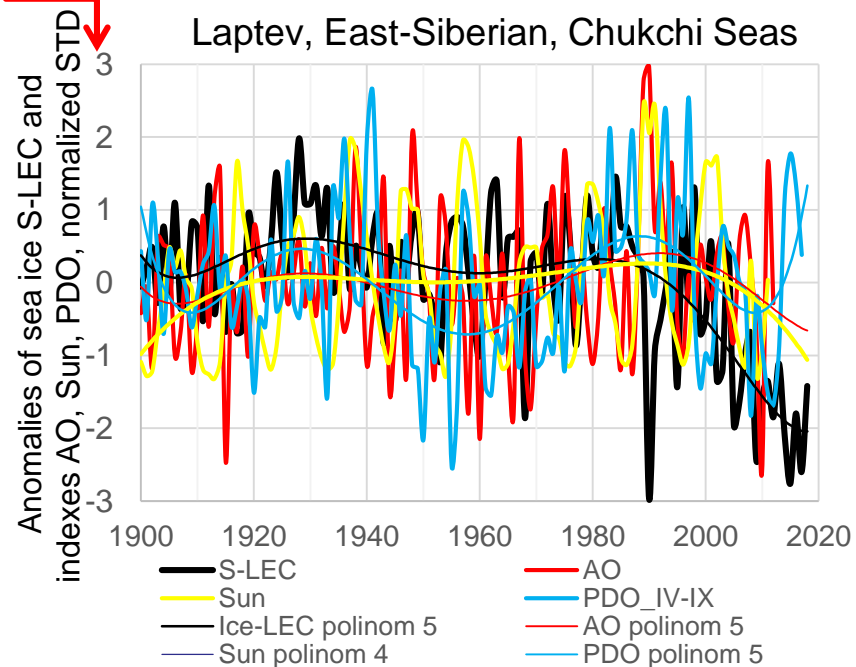
КОНЕЦ

Спасибо

Сопряженность межгодовых изменения ледовитости западных морей, гидрометеорологических и астро-геофизических индексов: пример ледовитость

Индексы: Atlantic Multidecadal Oscillation (-AMO), geomagnetic index (-Kp), parameter of Earth rotation (lod)

Индексы: Arctic Oscillation (AO), Pacific Decadal Decadal Oscillation (PDO), Volf numbers (Sun)



Долговременные изменения площади арктических льдов в августе демонстрируют тесную сопряженность с изменениями гидрометеорологическими и астрогеофизическими характеристиками.