

# Исследование связи вариаций площади арктического морского льда с притоком атмосферного скрытого тепла в Арктику на разных временных масштабах

Цзя С<sup>(1)</sup>, Ермаков Д.М.<sup>(2,3)</sup>

(1) МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет космических исследований, Москва, Россия

(2) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

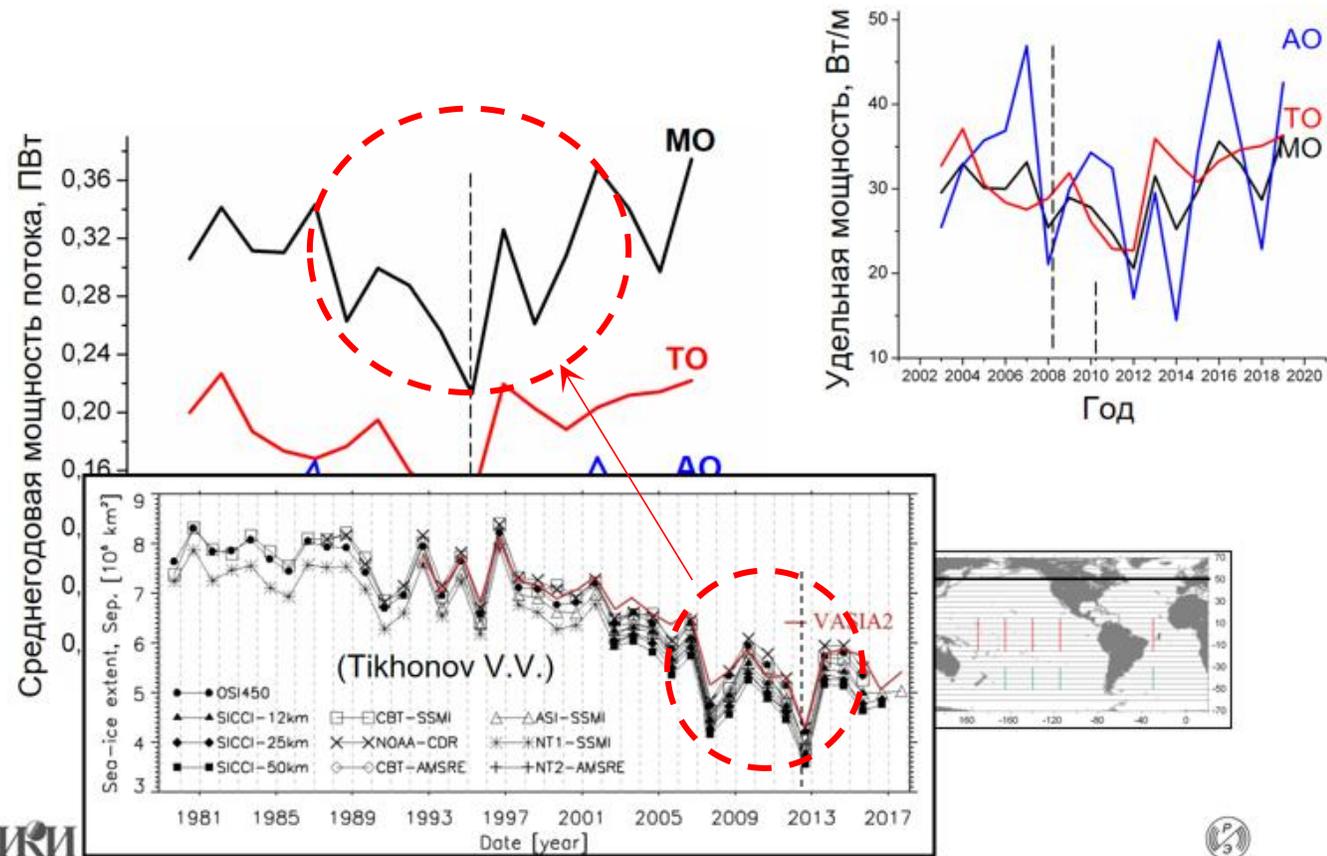
(3) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Фрязино, Россия

Москва 2024

# Постановка задачи

Современные исследования показывают, что существует тесная связь между меридиональным потоком скрытого тепла в Арктику и состоянием Арктического ледяного покрова. Как правило, перенос скрытого тепла рассчитывают по данным реанализа, но мы можем посчитать его непосредственно из спутниковых данных на основе подхода спутникового радиотепловидения. В предыдущей работе была показана связь между потоком скрытого тепла через границы 50N, 55N, 60N и общей площадью ледяного покрова Арктики на годовых масштабах. В нашей работе мы решили провести анализ на различных пространственно-временных масштабах.

## Меридиональные потоки через 50° с.ш.



# Исходные данные о ледяном покрове

- Бременского университета, Института физики окружающей среды (IUP)
- AMSR-2 ASI sea ice concentration data, Arctic, version 5.4 (HDF4)-Продукт строится с помощью алгоритма ARTIST Sea Ice (ASI), примененного к данным микроволнового радиометра AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) на спутнике GCOM-W1 (JAXA)  
[https://data.seaice.uni-bremen.de/amr2/asi\\_daygrid\\_swath/n3125/](https://data.seaice.uni-bremen.de/amr2/asi_daygrid_swath/n3125/)
- Пространственное разрешение: 3,125 км x 3,125 км
- шагом по времени: 1 день
- интервал времени: с 01.2013 по 12.2021
- анализируемая величина: суммарная сплоченность ледяного покрова внутри круга с заданной широтной границей: 55N, 60N, 65N, 70N

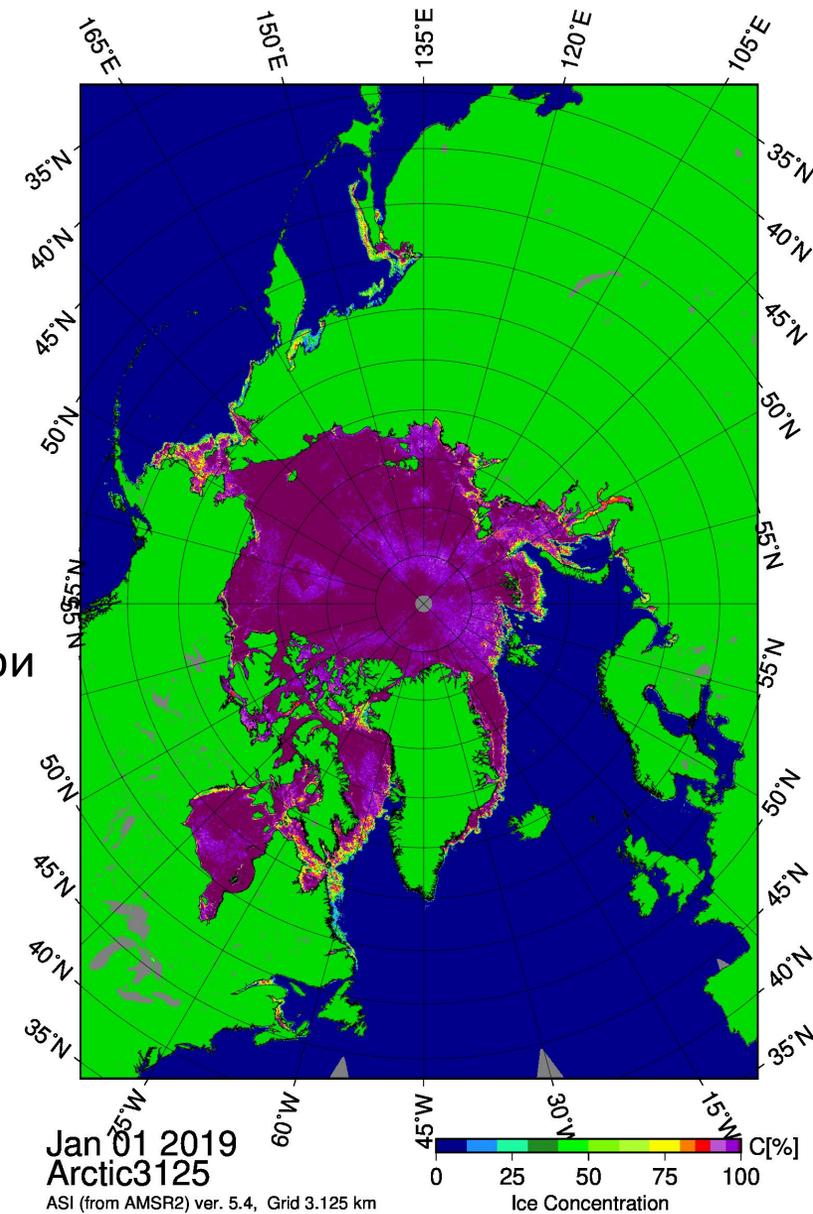
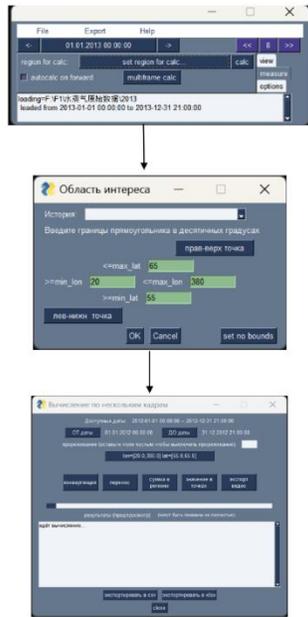
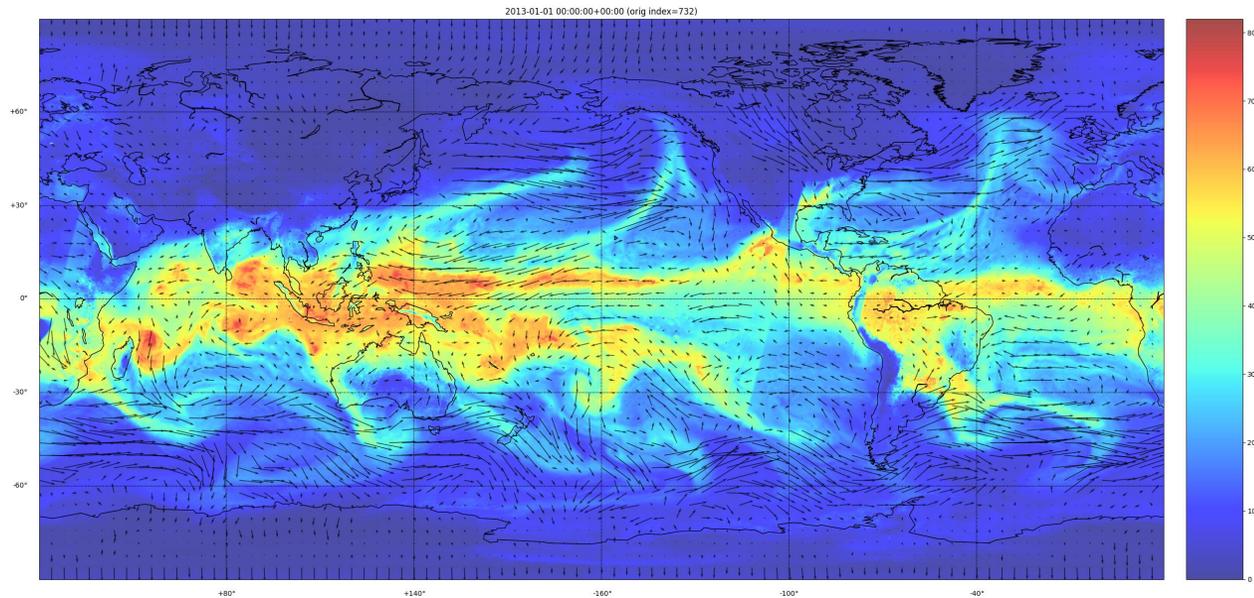


Рис. 1-Карта морского льда, рассчитанная по данным AMSR2 с помощью алгоритма морского льда ARTIST

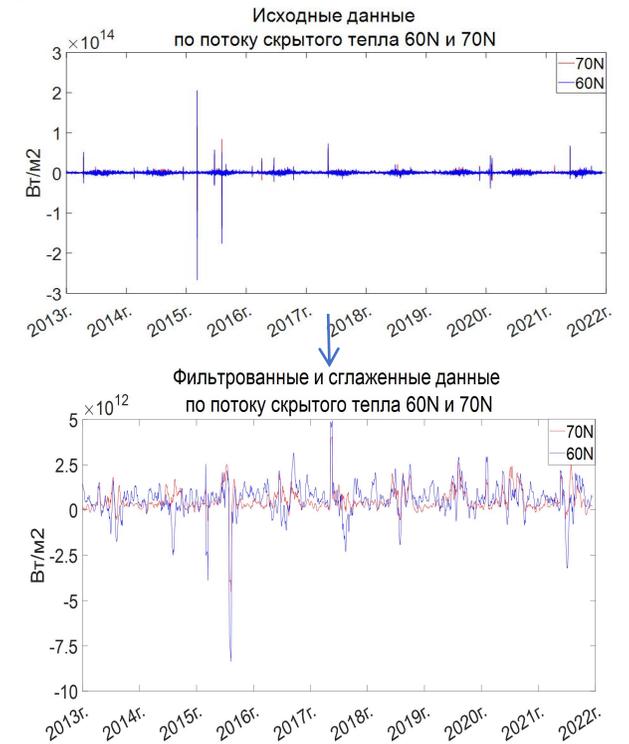
# Исходные данные о меридиональном переносе скрытого тепла



(a)



(b)



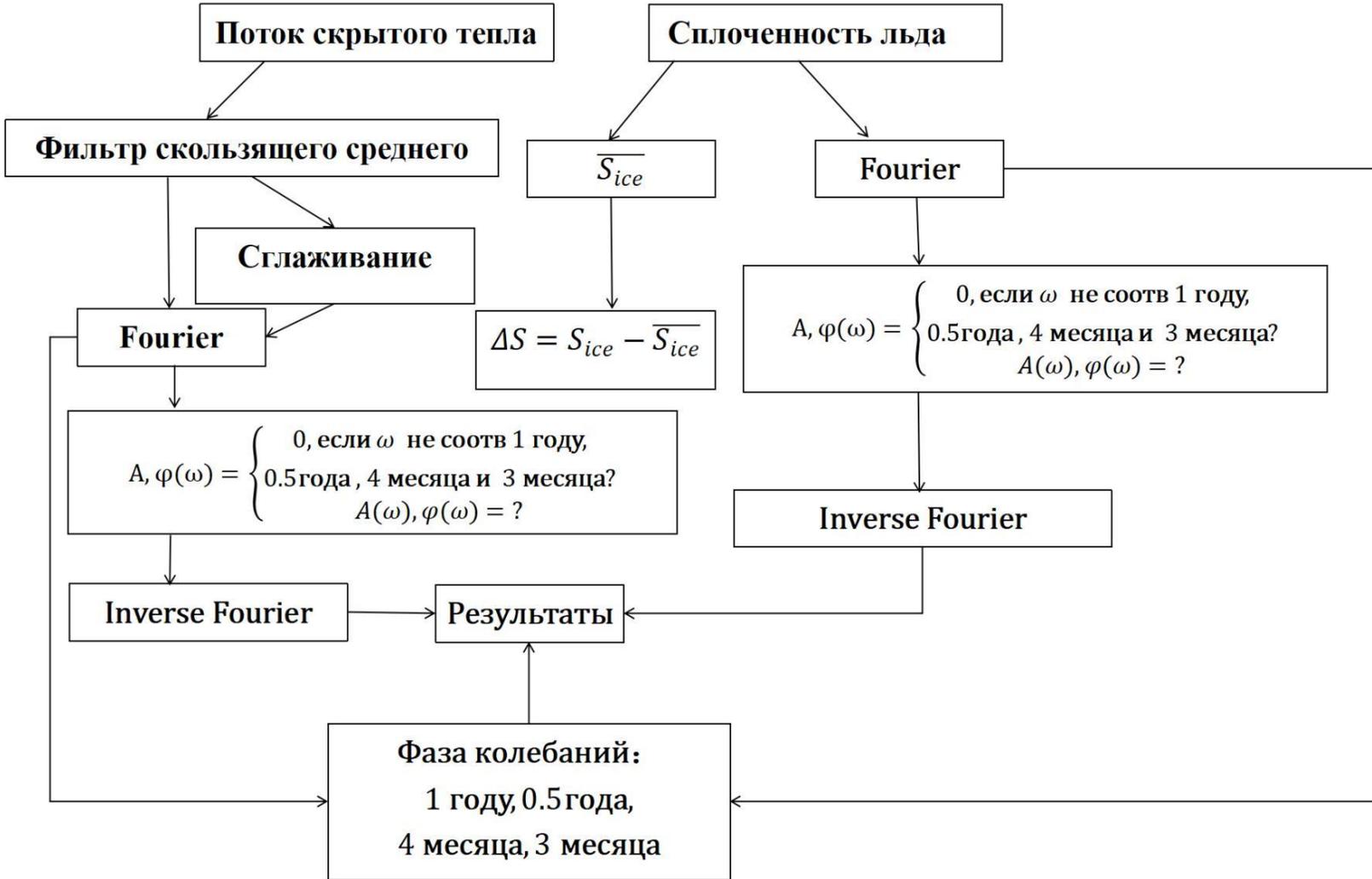
(c)

Рис. 2 – (a)(b) Работа программного «Viewflow» обеспечения, Втюрин С.А., Пашинов Е.В. «Viewflow»: программный инструмент визуализации и анализа динамики полей характеристик газового состава атмосферы // *Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 18. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a;

(c) Использование фильтров скользящего среднего (КИХ-фильтра) для исключения выбросов, связанных с отсутствием спутниковых данных или ошибками расчета.

- исходные данные: SSMIS PWV - Глобальные поля интегрального влагосодержания атмосферы ( $Q$ , общая масса водяного пара в вертикальном столбе единичной площади) рассчитаны по данным спутниковых СВЧ-радиометров SSMIS за период 2013-2021
- Пространственное разрешение: 0,25 географического градуса
- шагом по времени: 3 часа
- анализируемая величина: рассчитаны многолетние ряды мощности меридионального потока скрытого тепла через широтные границы 55, 60, 65, 70 N с использованием подхода спутникового радиотепловидения

# Методика анализа временной взаимосвязи

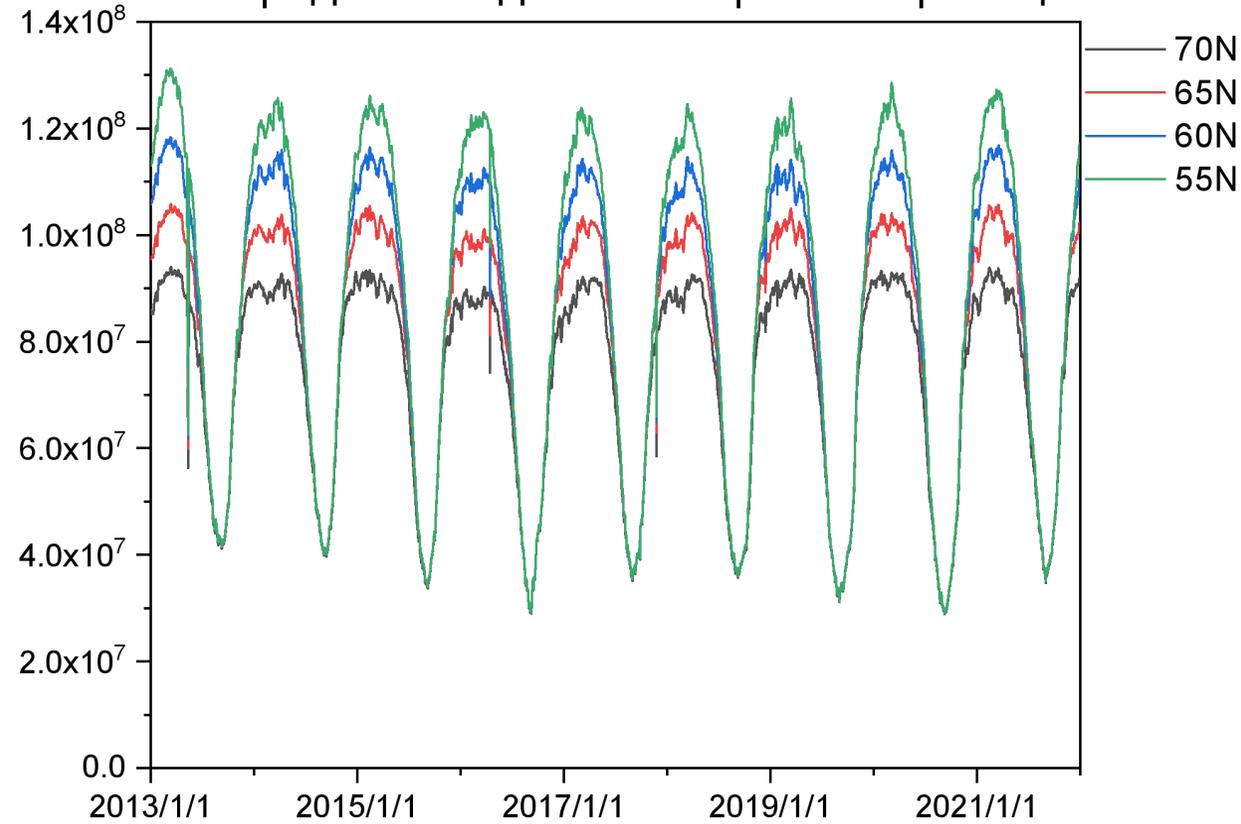


Основным подходом к совместному анализу полученных временных рядов характеристик ледяного покрова и переноса скрытого тепла было их разложение в спектр Фурье, поиск наиболее значимых гармоник и оценка их взаимного фазового расхождения при выборе разных меридиональных границ.

Рис. 3-Общая схема методики пространственно-временного анализа

# Обсуждение результатов: исходные временные ряды

суммарная сплоченность ледяного покрова  
в пределах заданных широтных границ



Перенос скрытого тепла через заданные границы

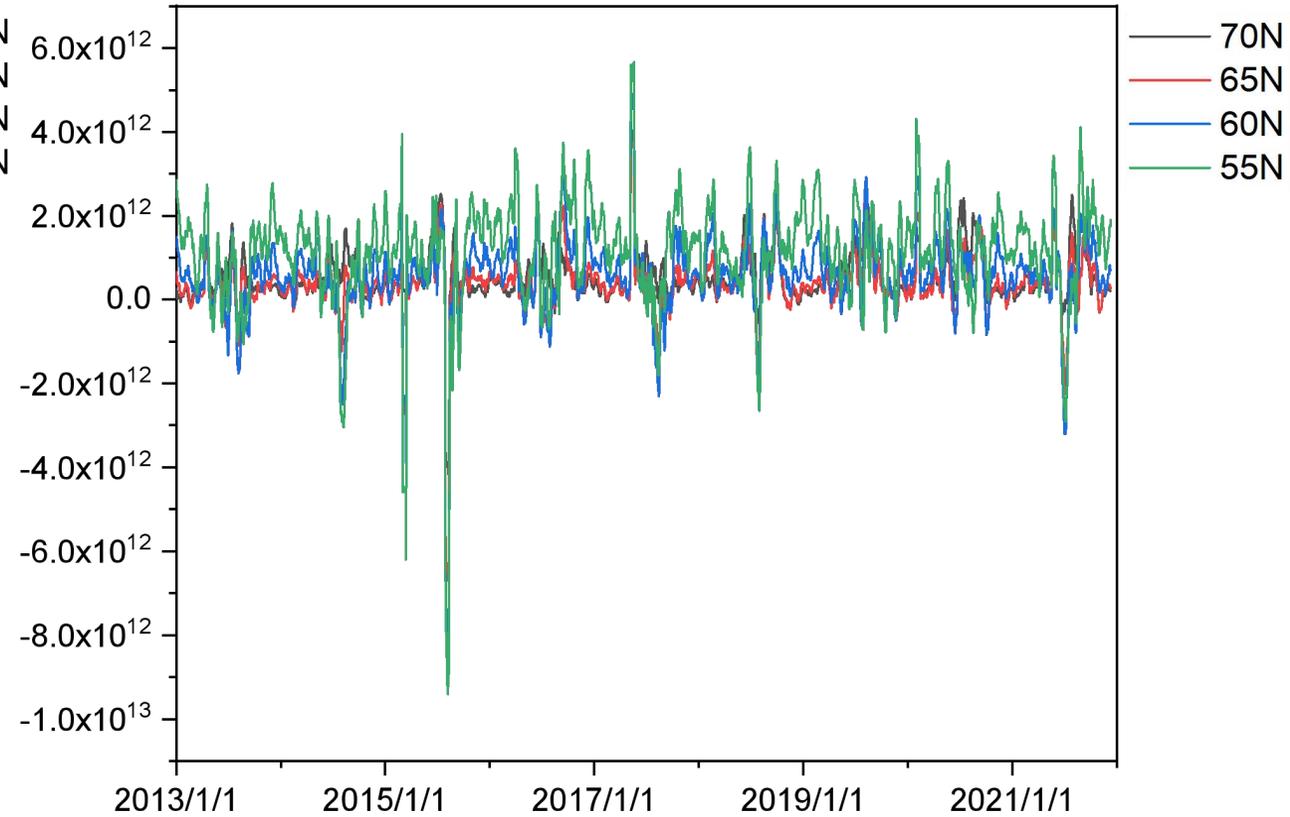


Рис. 4-график временного хода суммарной сплоченности ледяного покрова в пределах заданных широтных границ(слева) ,график временного хода переноса скрытого тепла через заданные границы (справа)

# Обсуждение результатов: частотные спектры для границы 55N

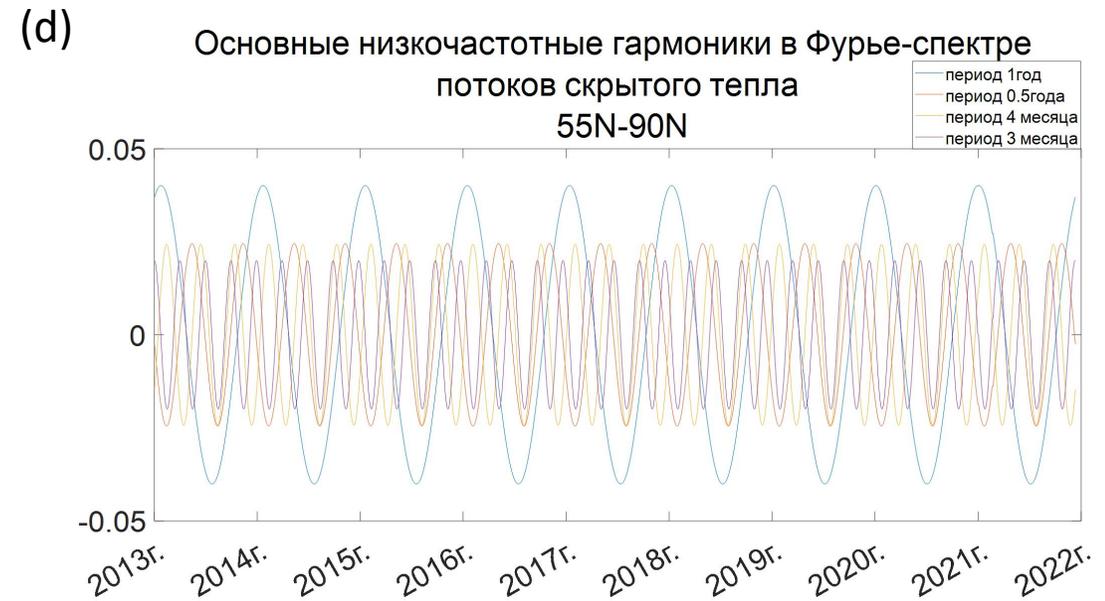
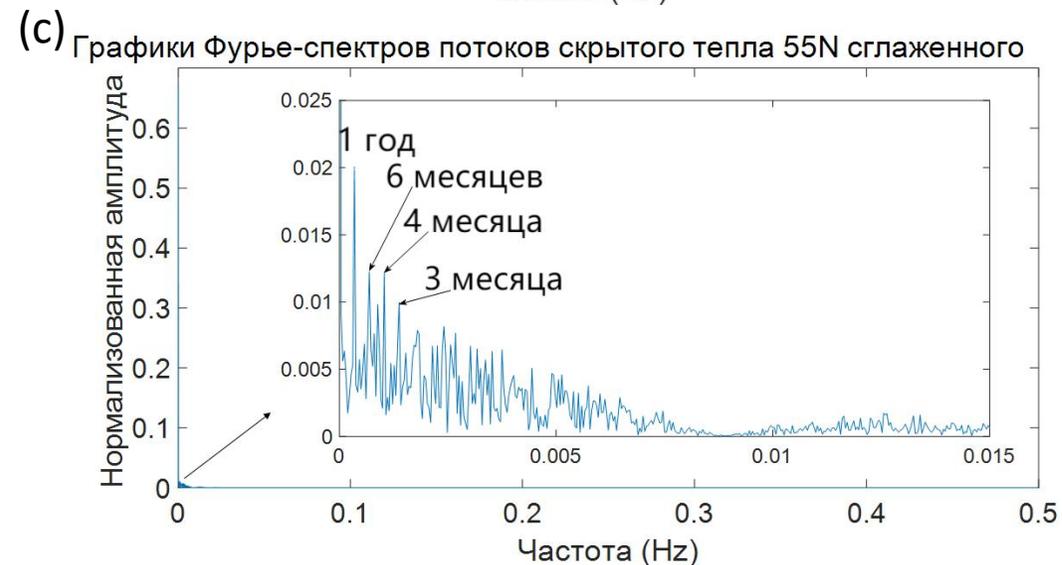
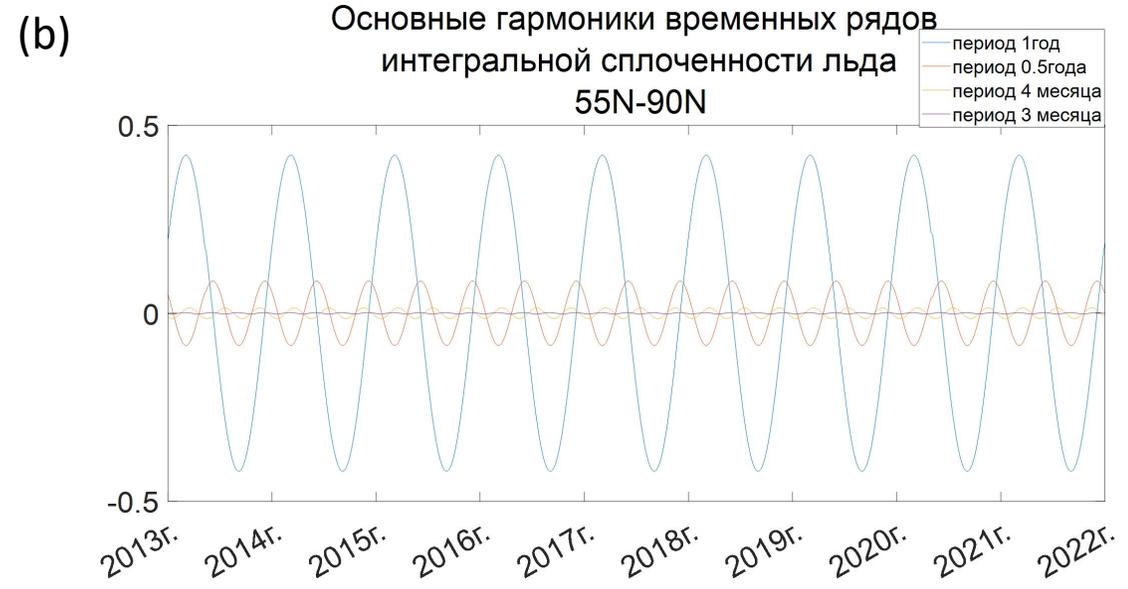
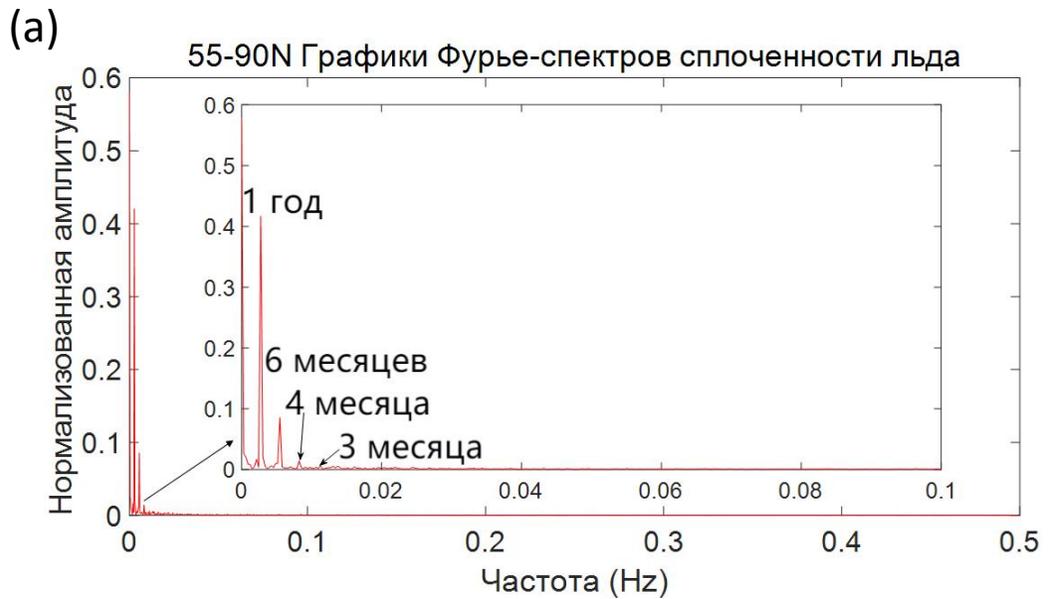


Рис. 5-(a) Фурье-спектры интегральной сплоченности льда для границы 55N;(b)Основные гармоники временных рядов интегральной сплоченности льда (граница 55N);(c)Фурье-спектр потоков скрытого тепла через границы 55N;(d) Основные низкочастотные гармоники в Фурье-спектре потоков скрытого тепла (граница 55N)

# Обсуждение результатов: частотные спектры для границы 60N

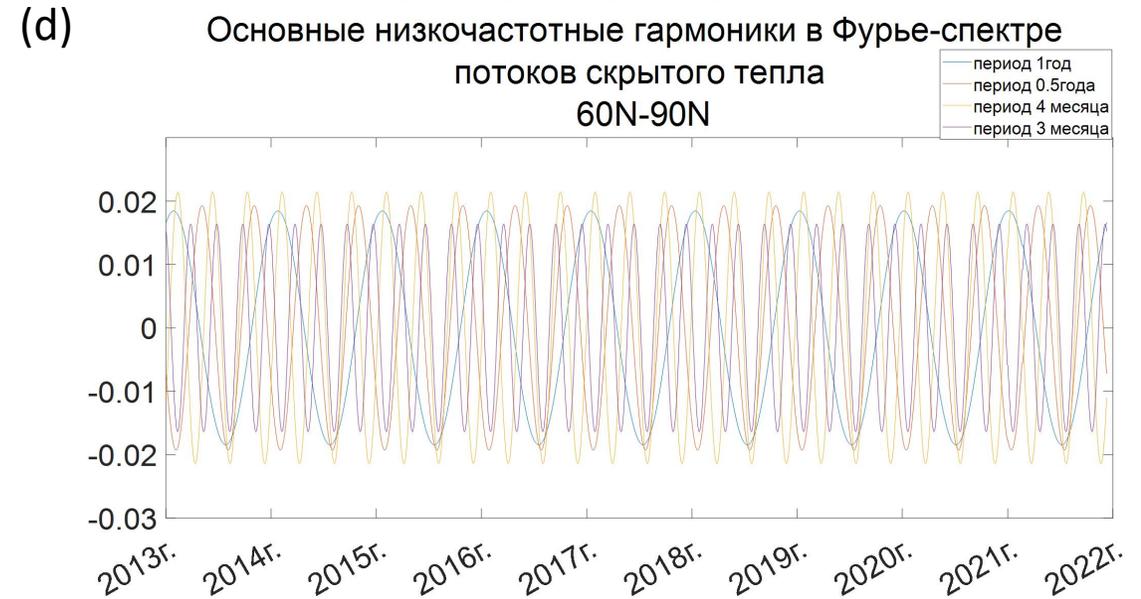
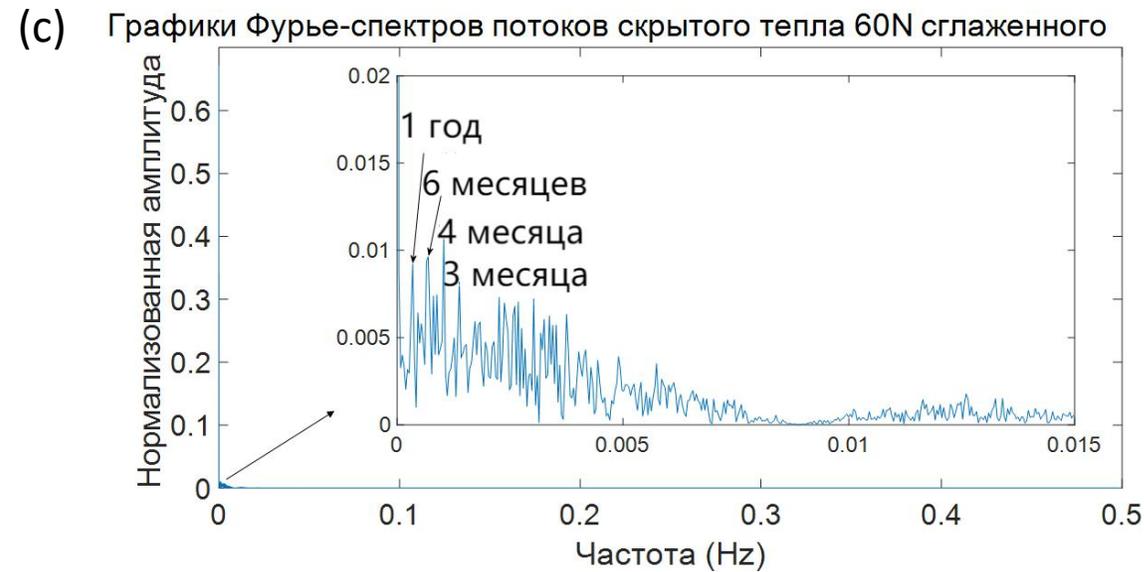
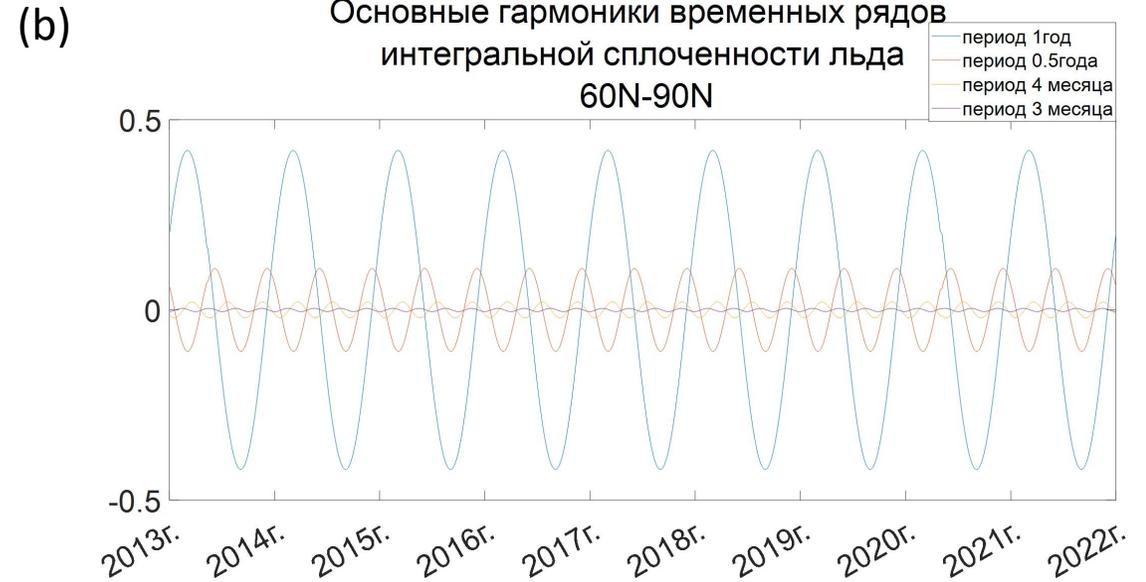
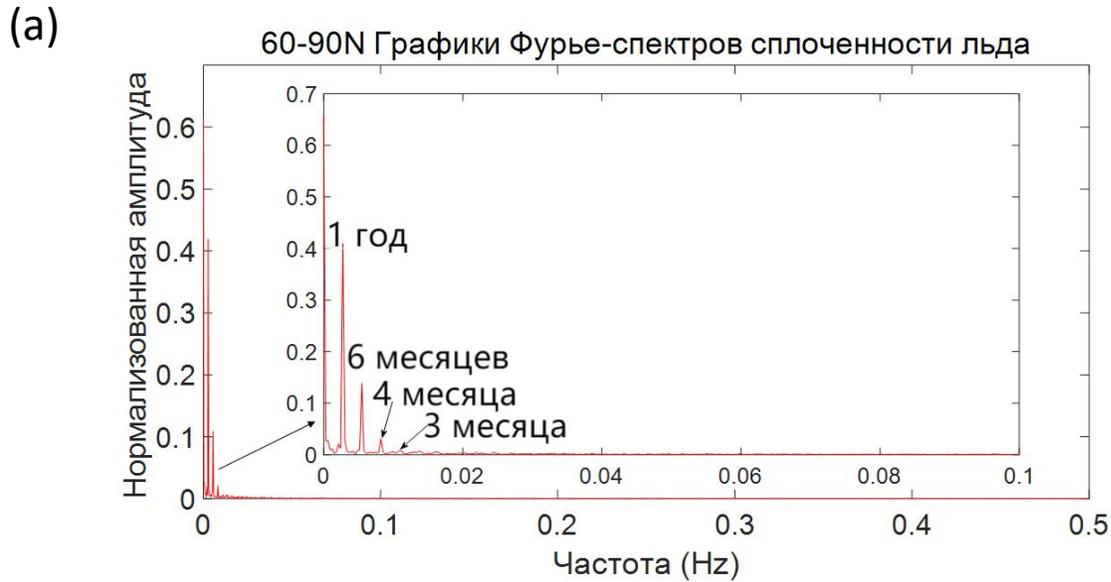


Рис. 6-(a) Фурье-спектры интегральной сплоченности льда для границы 60N;(b) Основные гармоники временных рядов интегральной сплоченности льда (граница 60N);(c) Фурье-спектр потоков скрытого тепла через границы 60N;(d) Основные низкочастотные гармоники в Фурье-спектре потоков скрытого тепла (граница 60N)

# Обсуждение результатов: частотные спектры для границы 65N

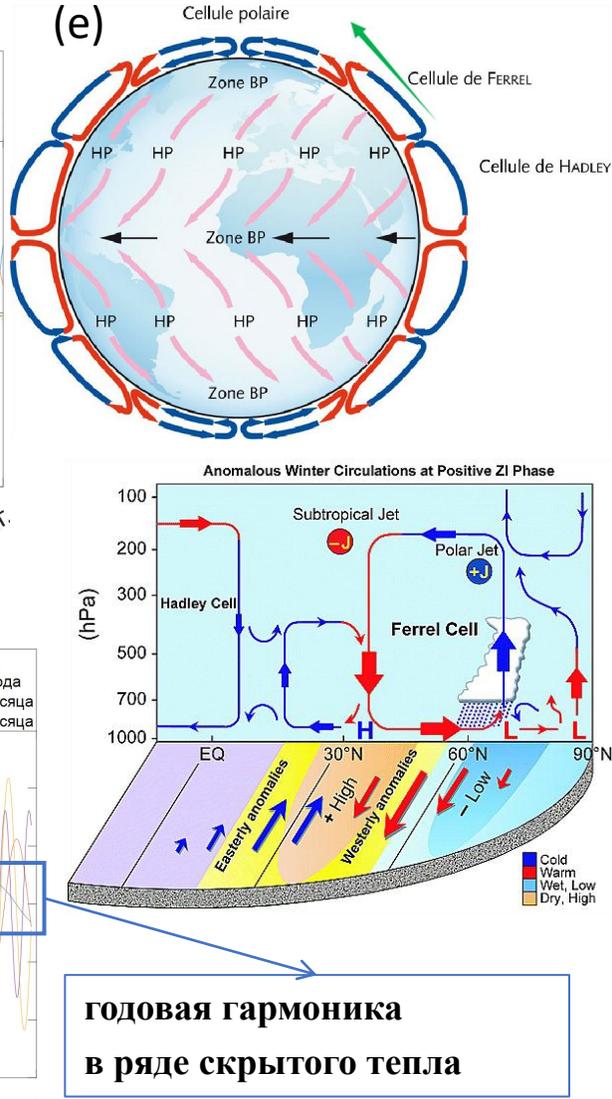
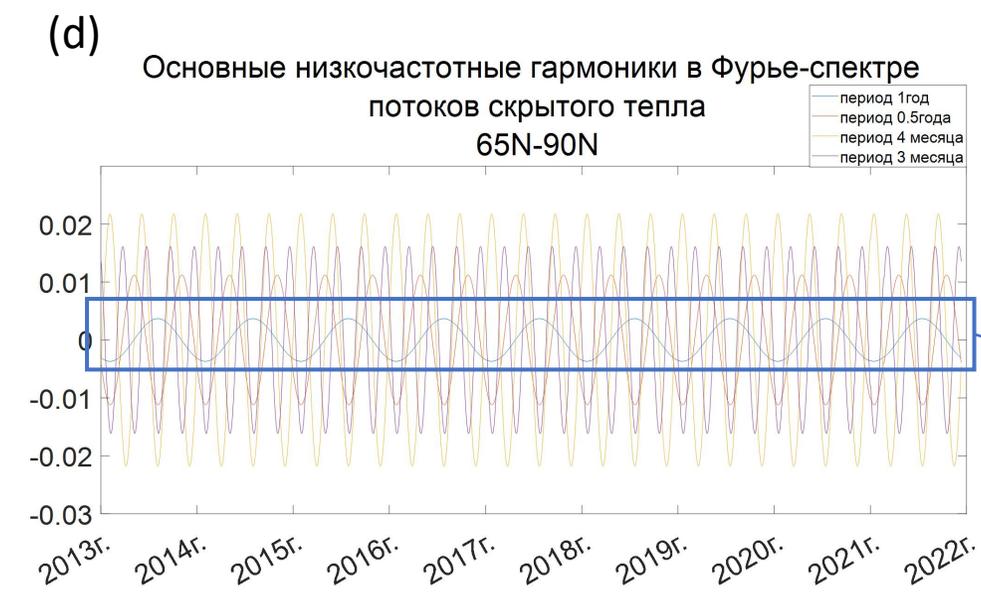
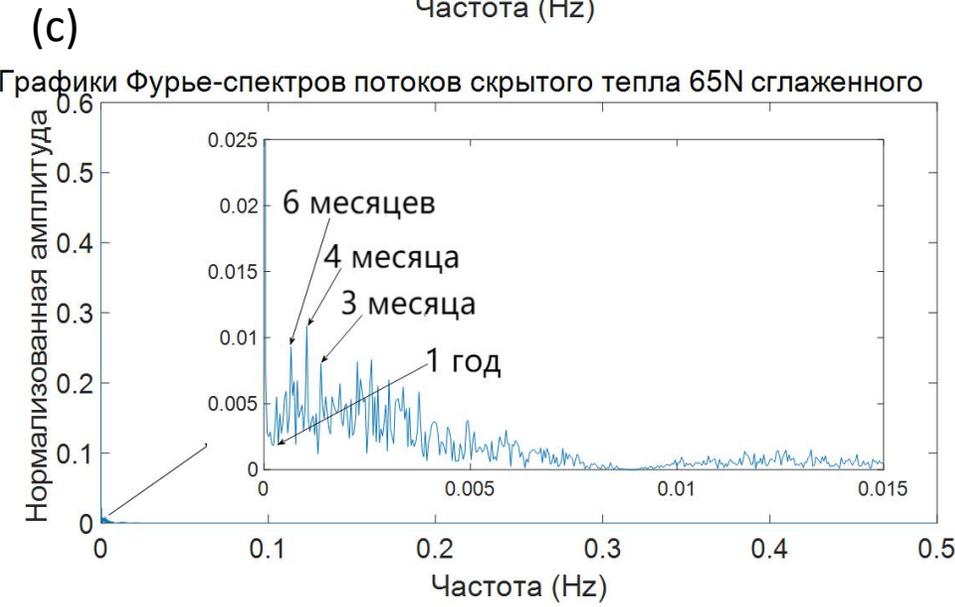
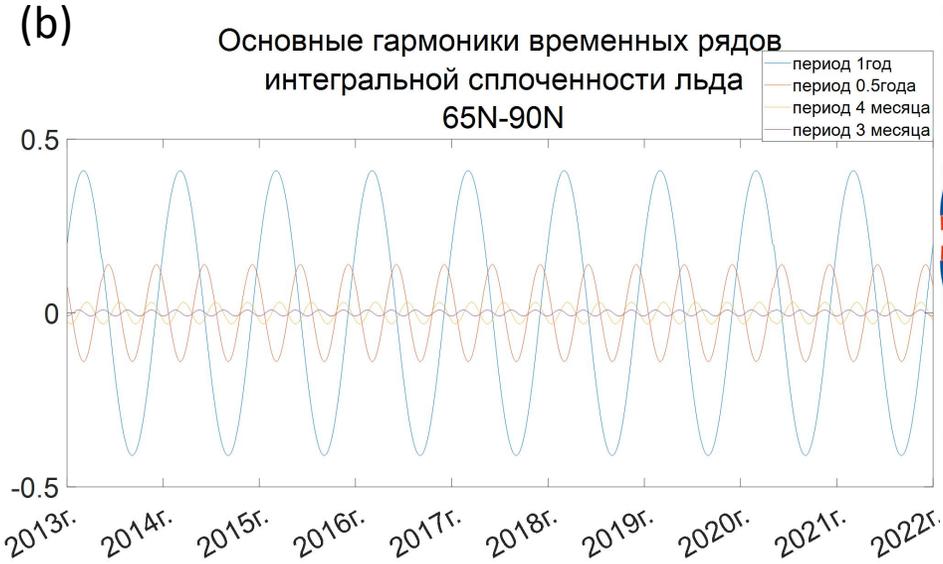
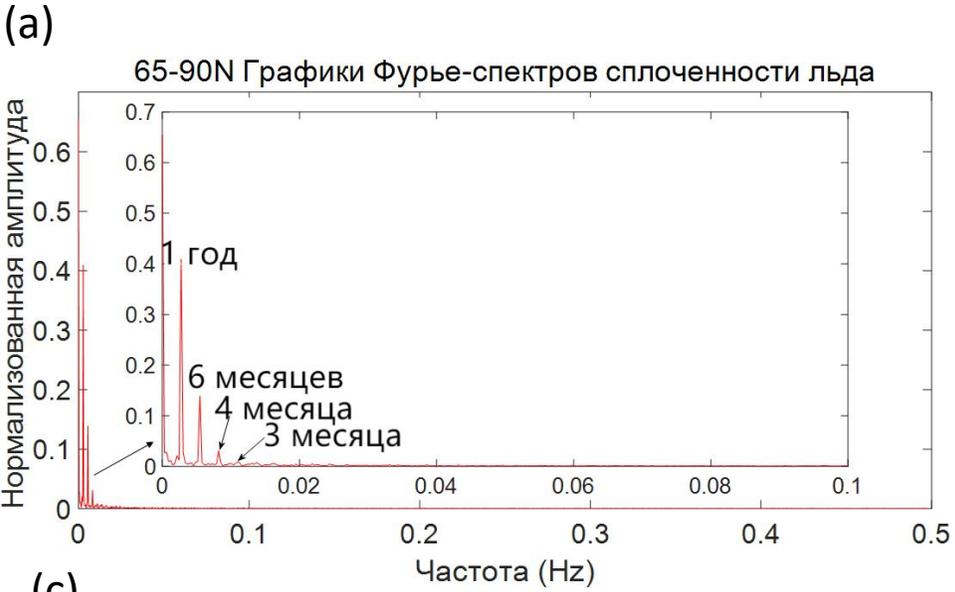


Рис.7-(a) Фурье-спектры интегральной сплоченности льда для границы 65N;(b)Основные гармоники временных рядов интегральной сплоченности льда (граница 65N);(c)Фурье-спектр потоков скрытого тепла через границы 65N;(d) Основные низкочастотные гармоники в Фурье-спектре потоков скрытого тепла (граница 65N);(e)Циркуляция атмосферы.

# Обсуждение результатов: частотные спектры для границы 70N

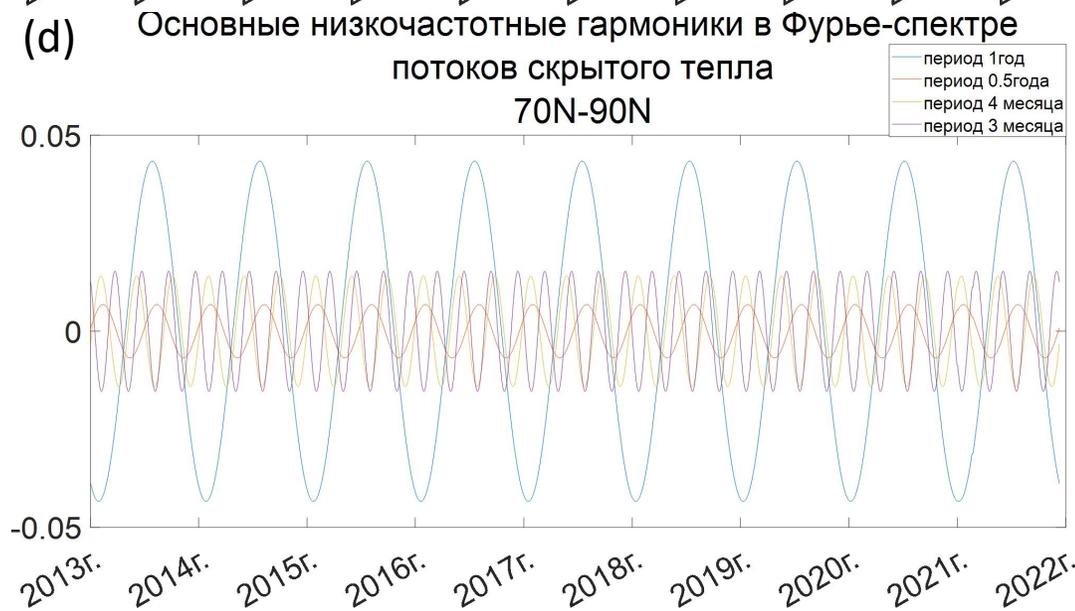
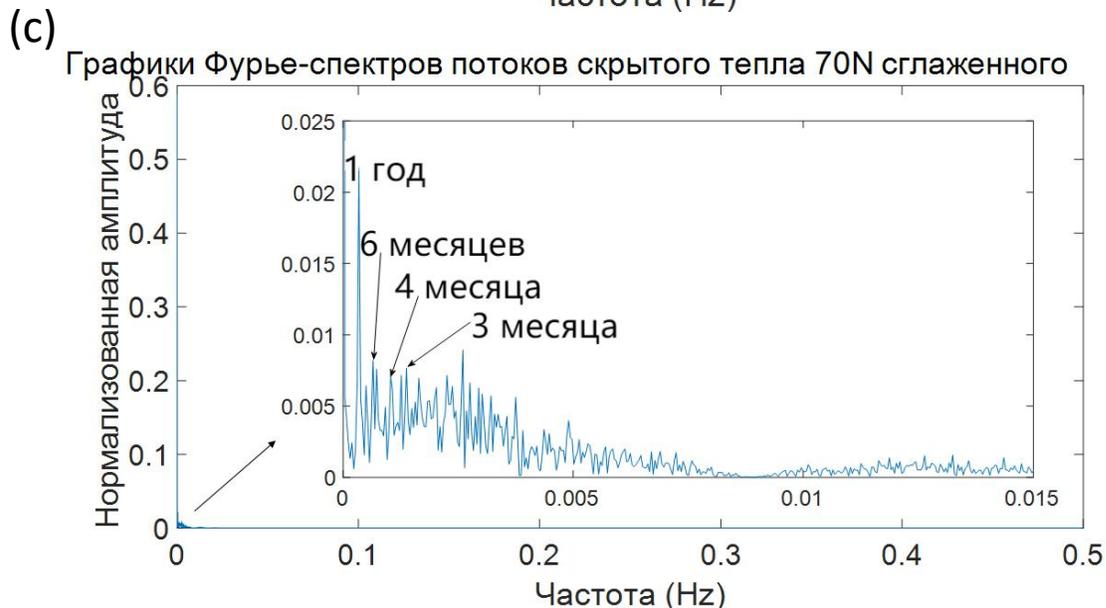
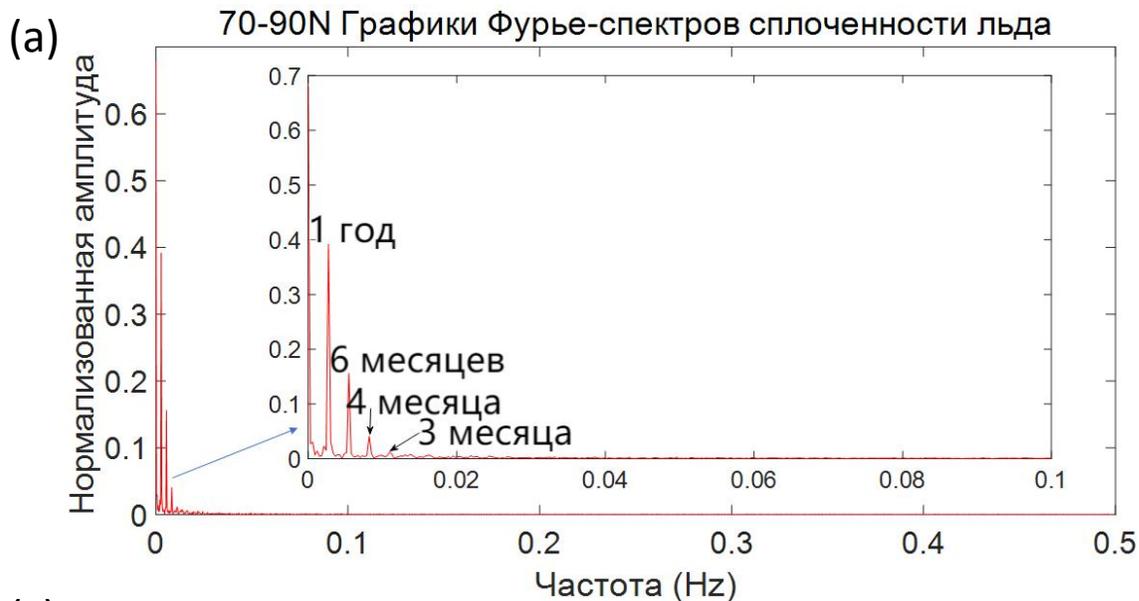
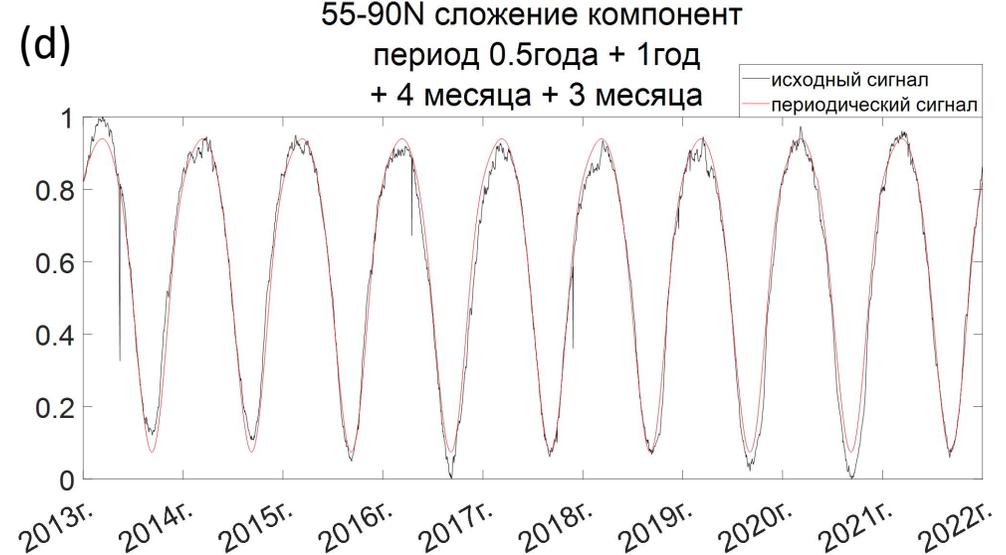
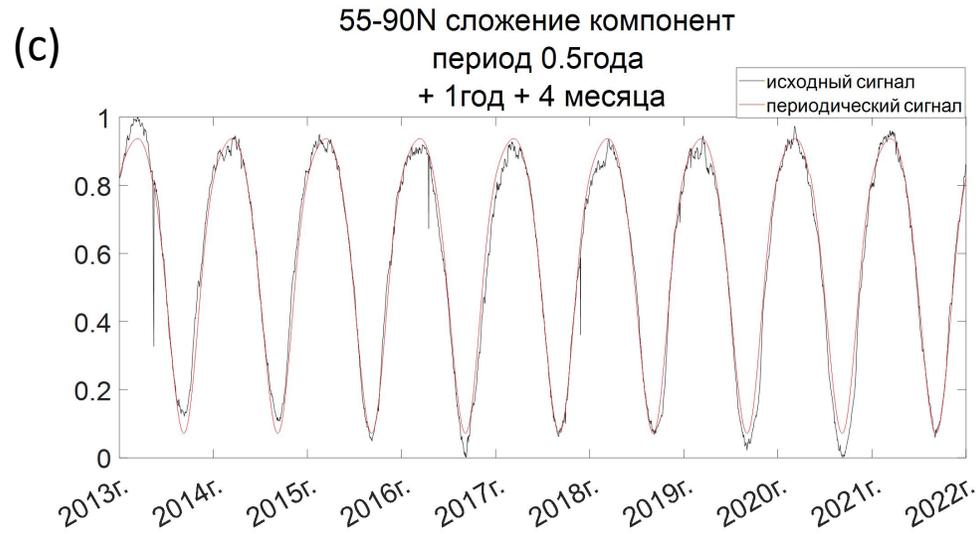
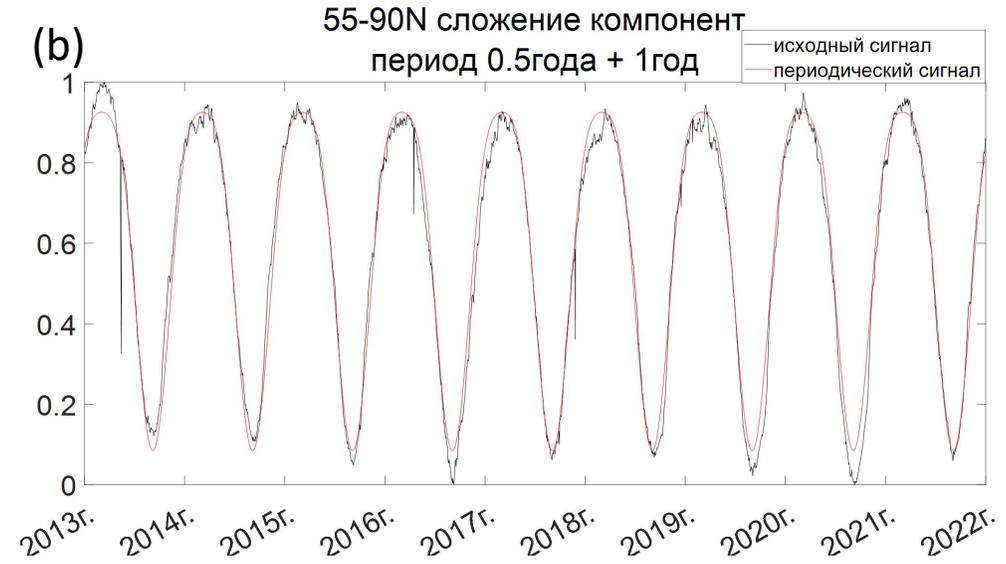
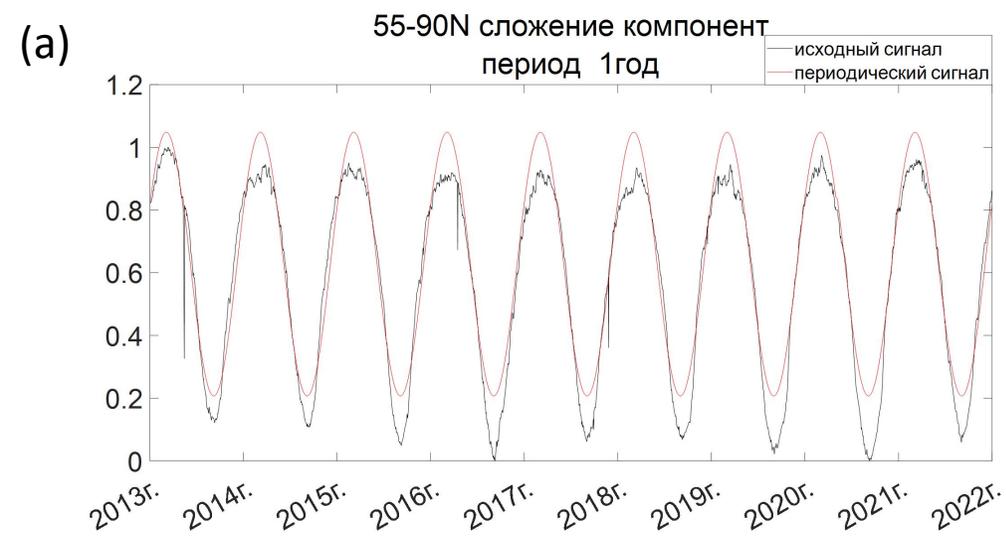


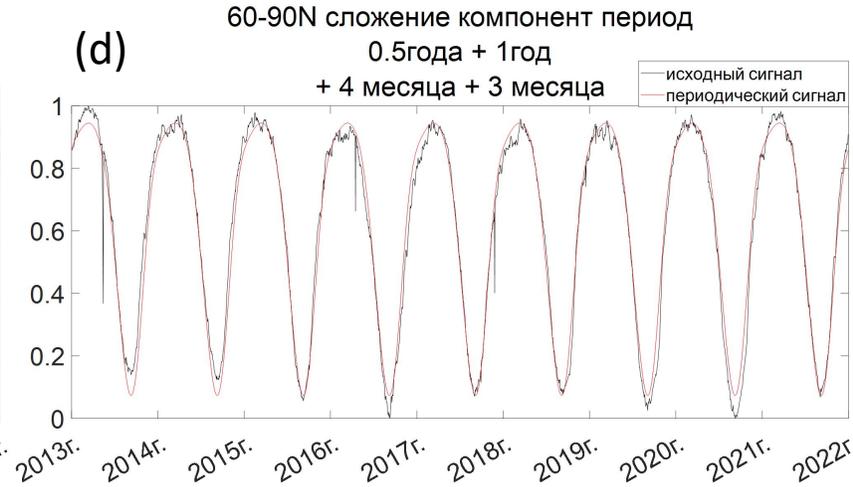
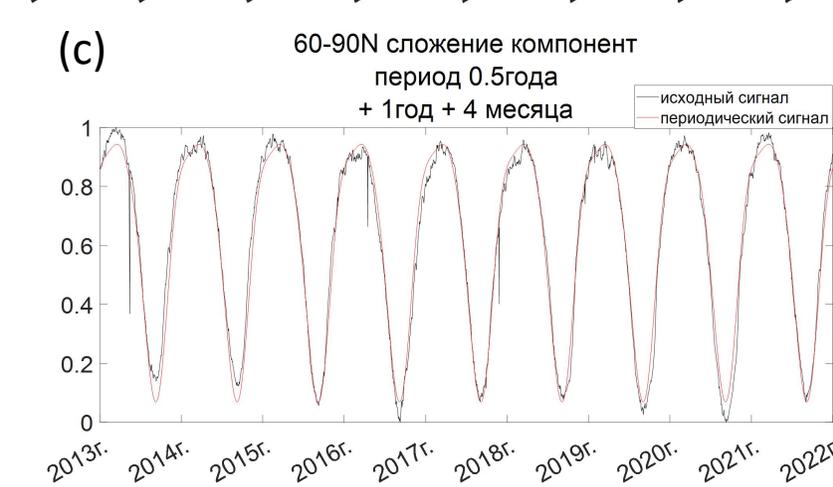
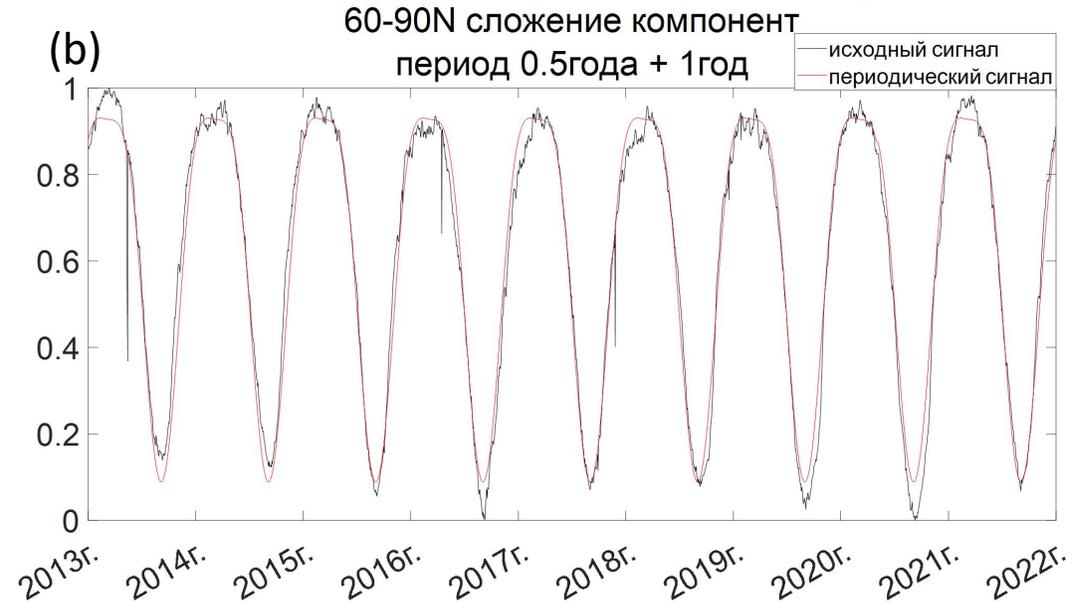
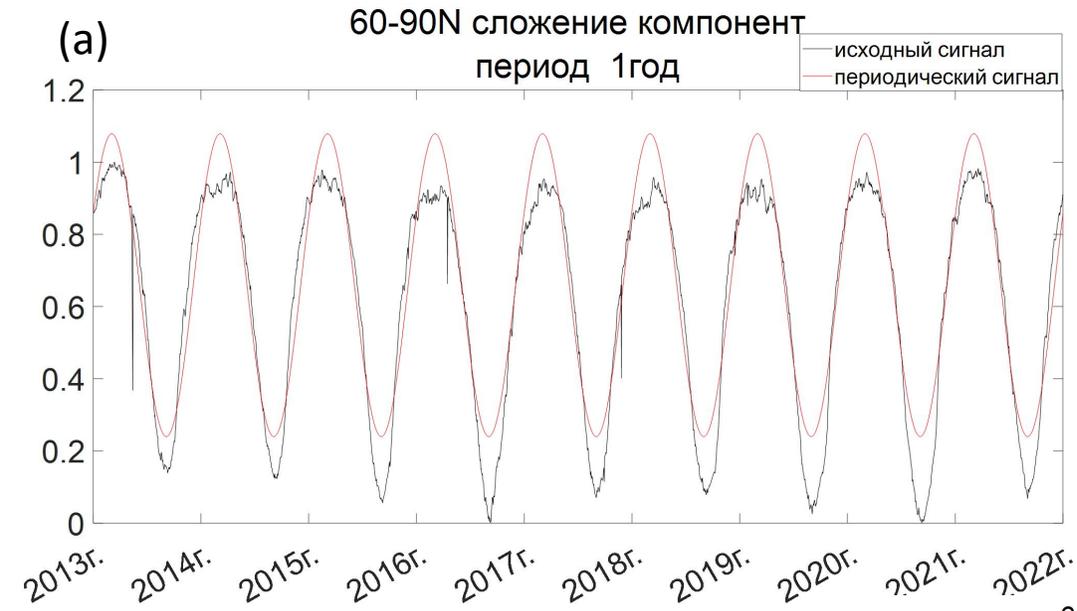
Рис. 8-(a) Фурье-спектры интегральной сплоченности льда для границы 70N;(b)Основные гармоники временных рядов интегральной сплоченности льда (граница 70N);(c)Фурье-спектр потоков скрытого тепла через границы 70N;(d) Основные низкочастотные гармоники в Фурье-спектре потоков скрытого тепла(граница 70N)

# Обсуждение результатов: упрощенная модель динамики ледяного покрова, граница 55N

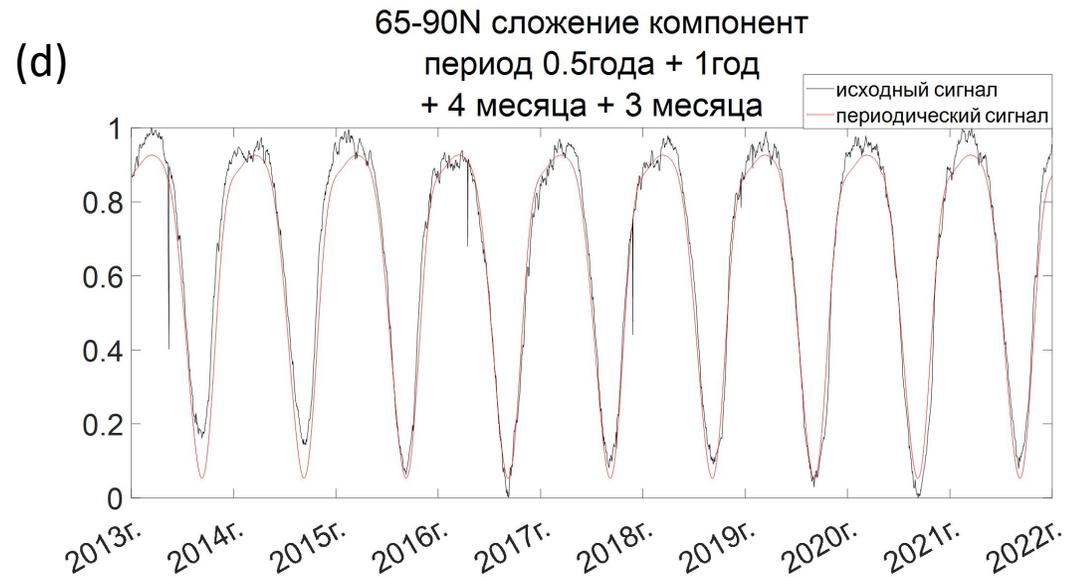
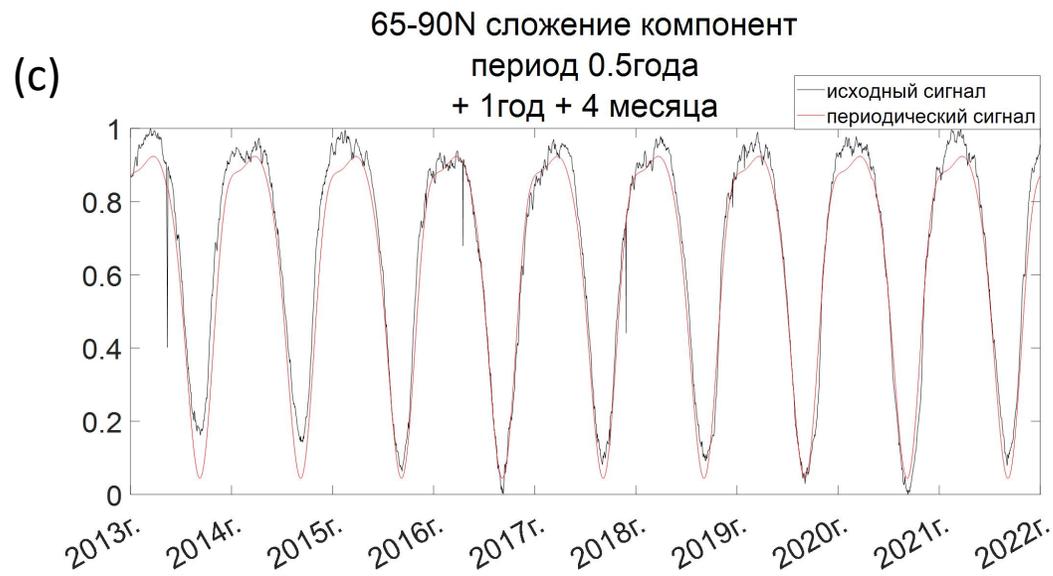
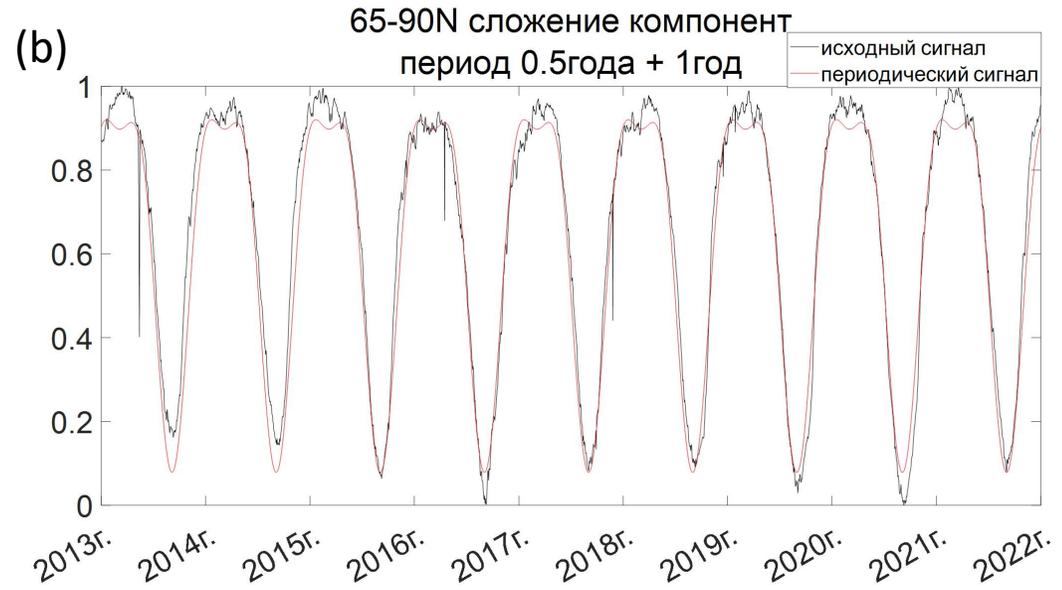
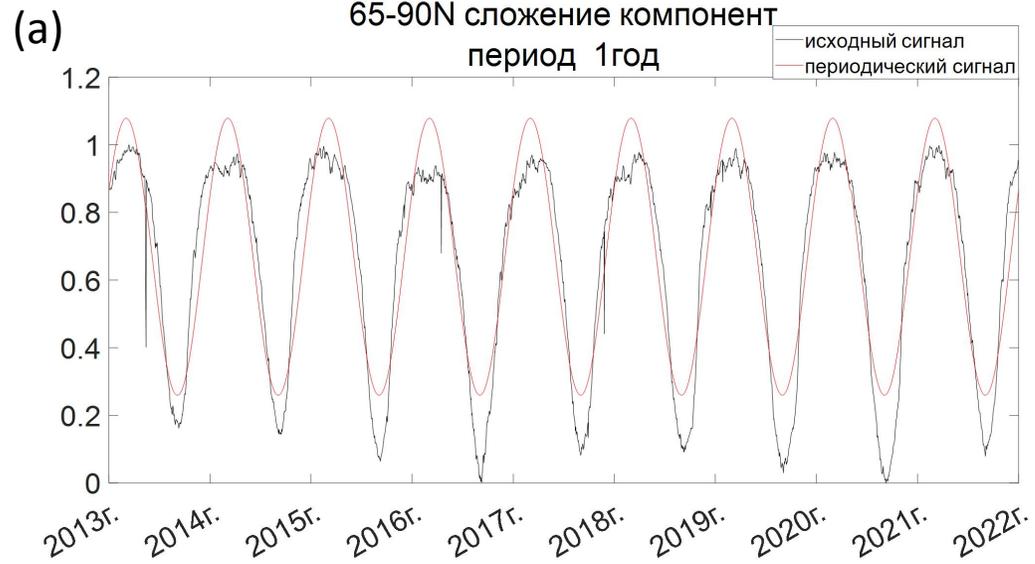


Из графиков видно, что полугодовая гармоника отвечает за разную длительность холодного и теплого сезонов, четырехмесячная – уточняет сезонную скорость образования и разрушения ледяного покрова, трехмесячная – вариации состояния ледяного покрова в максимуме развития.

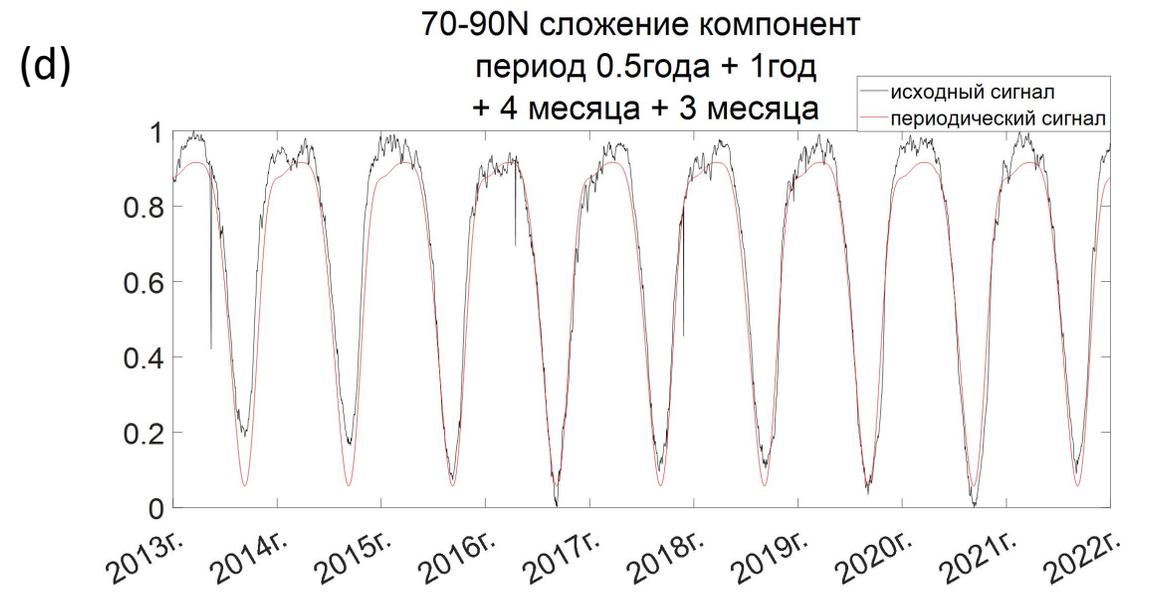
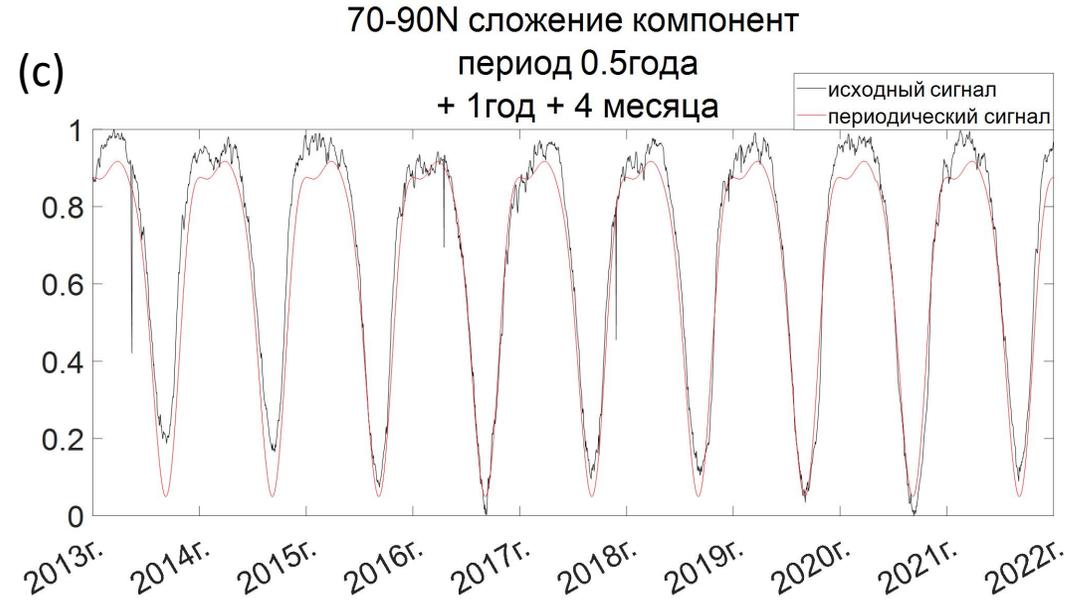
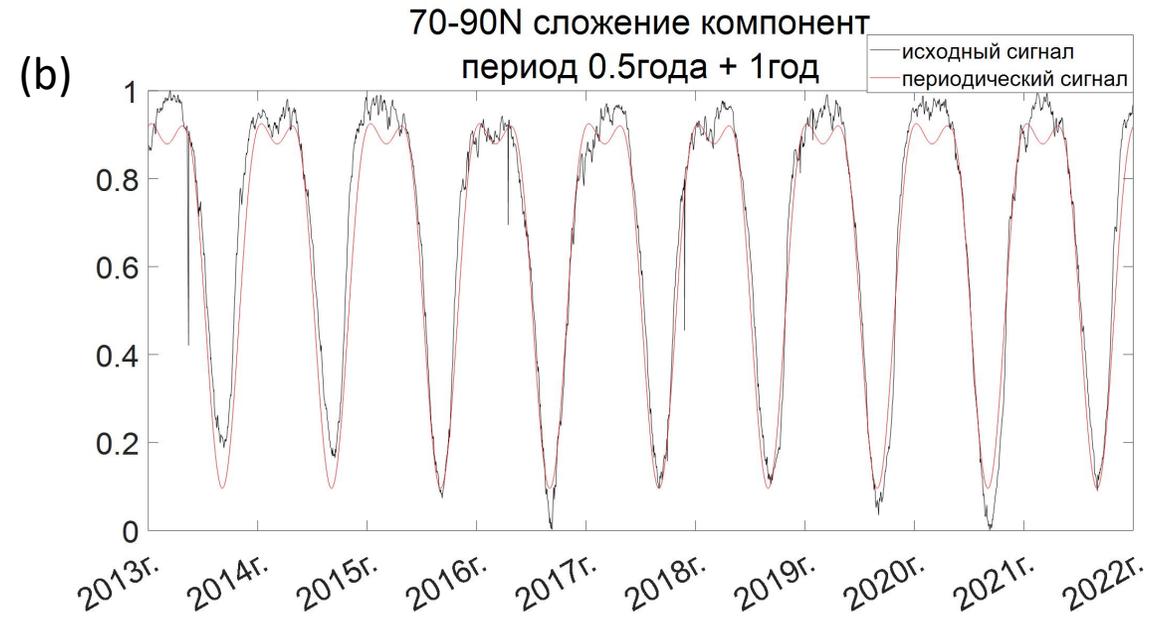
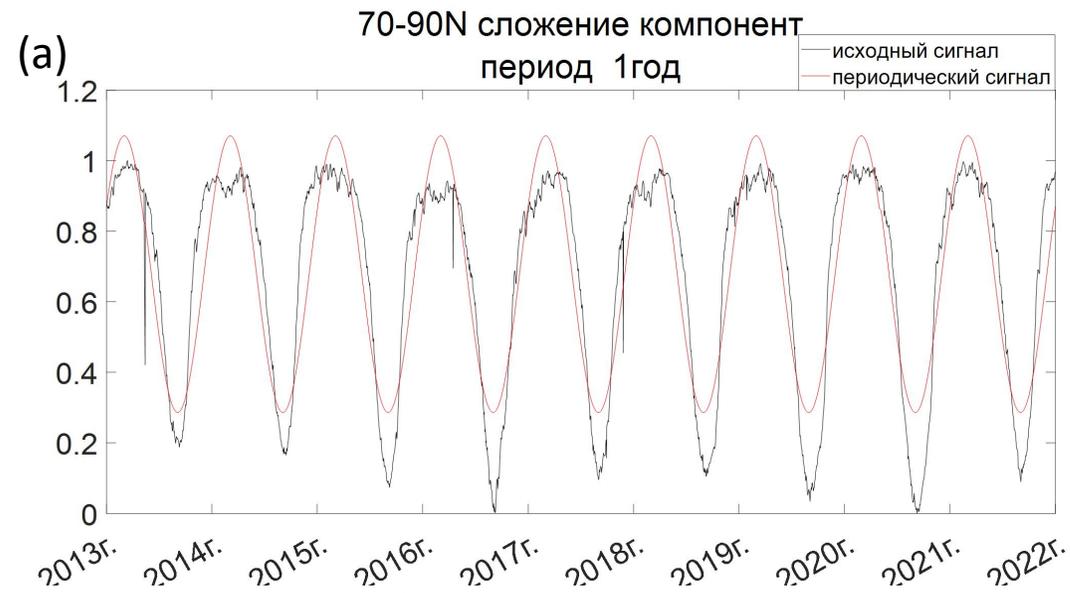
# Обсуждение результатов: упрощенная модель динамики ледяного покрова, граница 60N



# Обсуждение результатов: упрощенная модель динамики ледяного покрова, граница 65N



# Обсуждение результатов: упрощенная модель динамики ледяного покрова, граница 70N



# Обсуждение результатов: фазовая разность в упрощенных динамических моделях

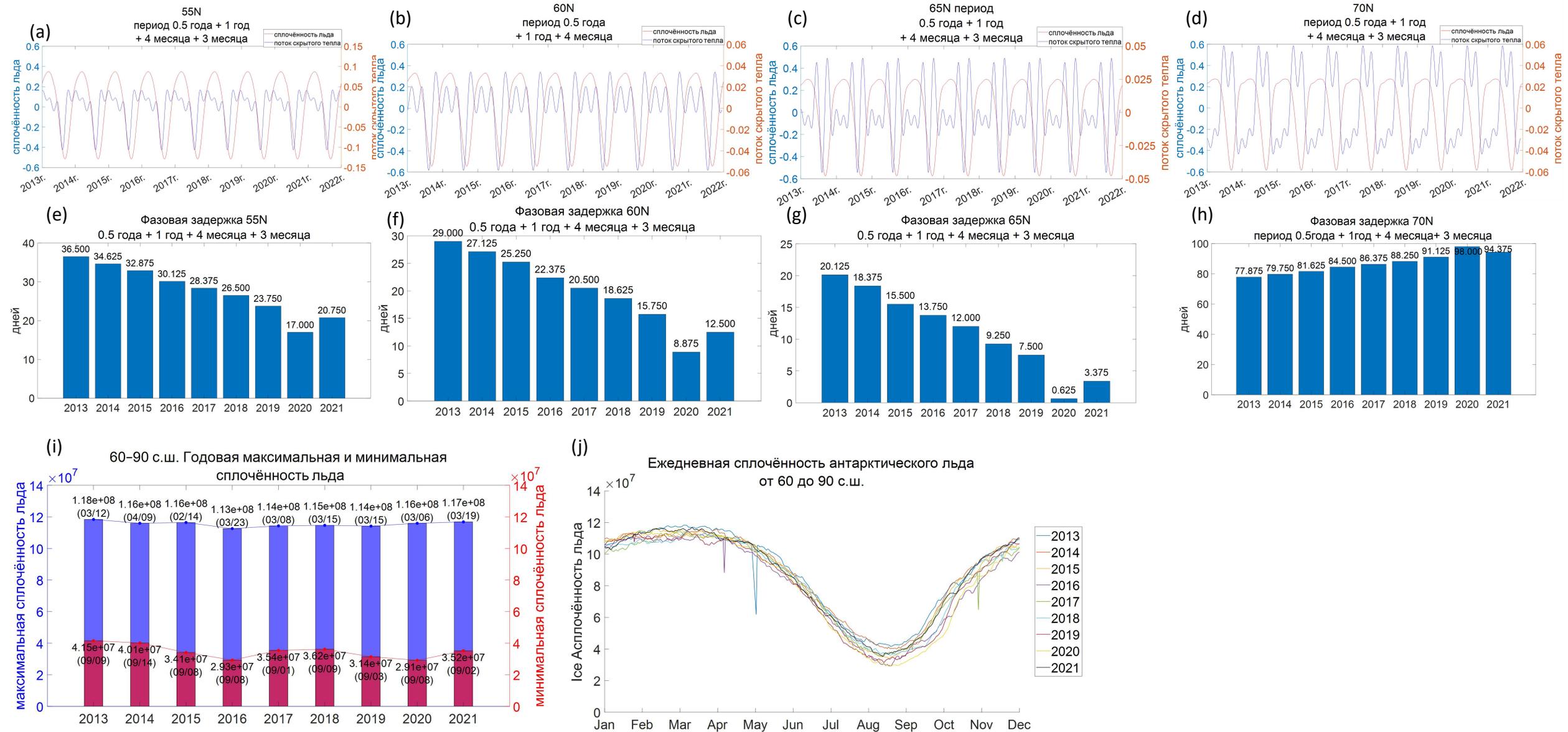


Рис.9 -(a)(b)(c)(d)Сопоставление упрощенных динамических моделей интегральной сплоченности льда и меридиональных потоков скрытого тепла (граница 55,60,65,70N);(e)(f)(g)(h)Фазовая задержка между максимумом потоков и минимумом концентрации льда (граница 55,60,65,70N);(i)60с.ш. Даты ежегодных максимальных и минимальных сплоченности льда;(j) 60 с.ш.Кривые сплоченности льда для каждого года 2013-2021.

# Обсуждение результатов: универсальные методы совместного анализа

- вейвлет-анализ

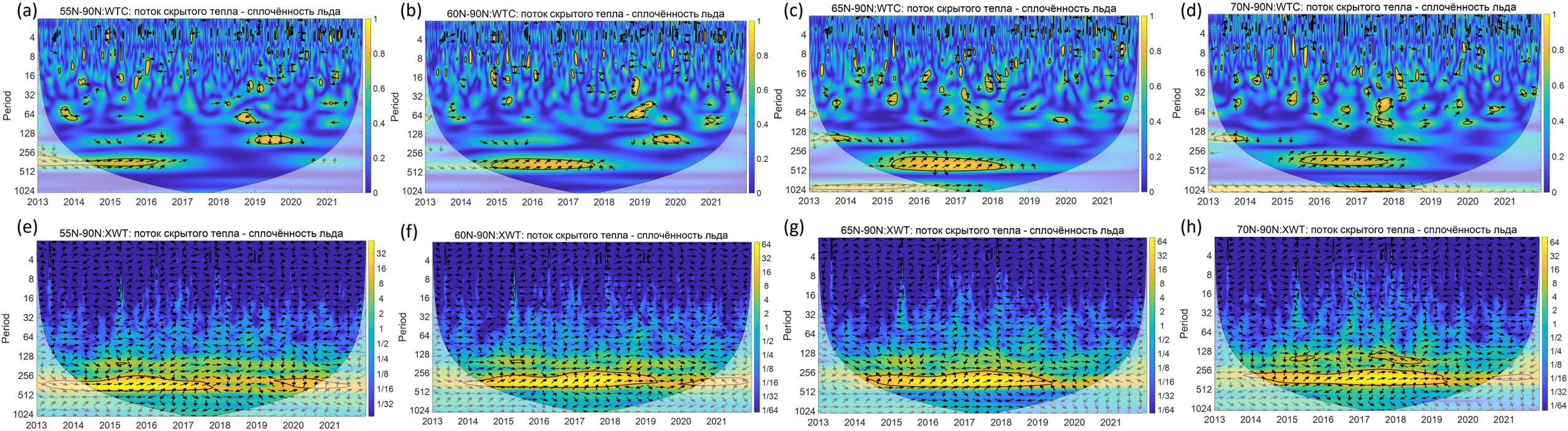


Рис.10 (a,b,c,d)--На 70-90 с.ш. период в 1024 дня (три года) настолько значителен, что его можно рассматривать как многолетний цикл изменения льда с одинаковым направлением (внизу справа), тогда как в диапазоне от 256 до 512 можно рассматривать как один год льда с почти одинаковым направлением изменения (вверху справа) из всех широтных диапазонов (55N-90N, 60N-90N, 65N-90N, 70N-90N), т.е. сгущение льда опережает поток скрытого тепла примерно на  $45^\circ$  и значительна в основном в 2015-2018 гг.

(e,f,g,h)--Значительная область высоких значений энергии существует между 2014 и 2019 годами в рамках более длительного периода (от 256 до 512 дней), что указывает на сильную корреляцию между потоками скрытого тепла и межгодовыми вариациями льда в это время.

• Метод скользящего окна

Данные об использованиях:

основная переменная: SIC: исходные данные

вторичная переменная: LH: Гармоническое комбинированное моделирование исходных

данных (один год+ шесть месяцев+четыре месяца+три месяца)

ОКНО СПЛОЧЕННОСТЬ ЛЬДА

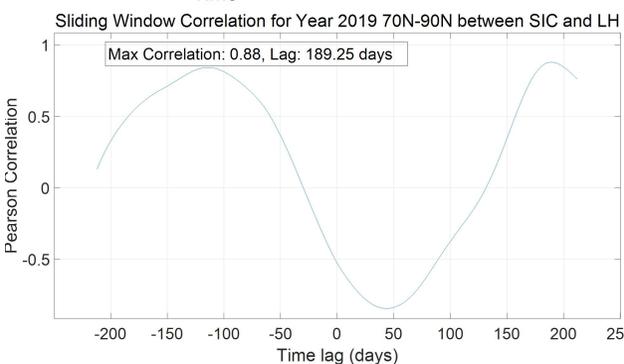
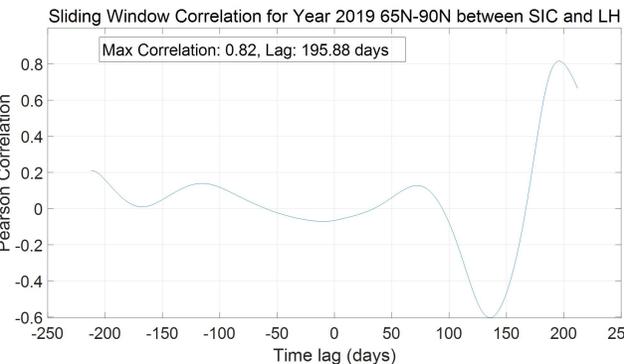
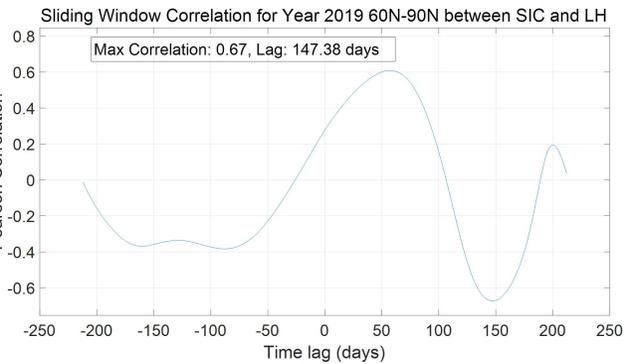
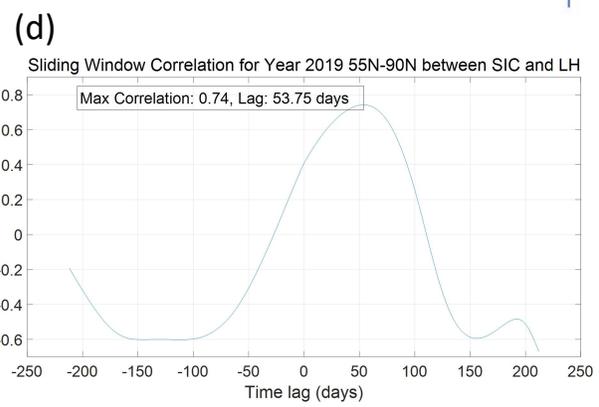
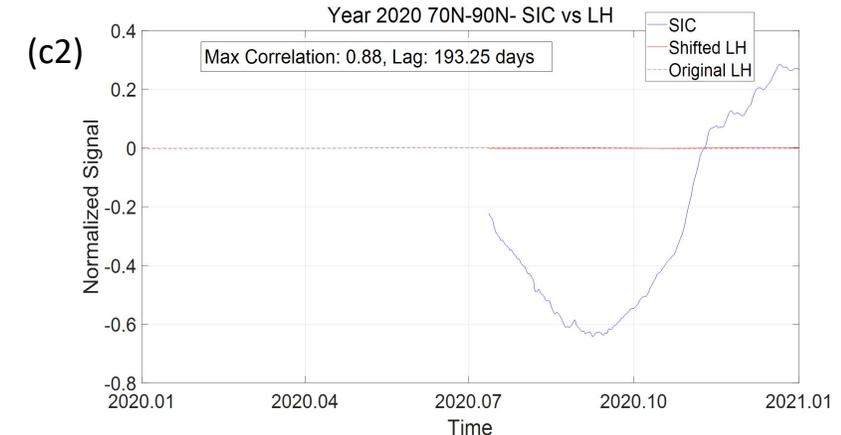
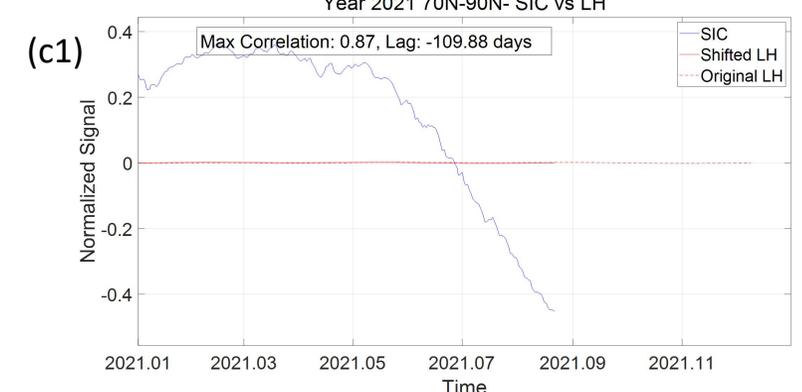
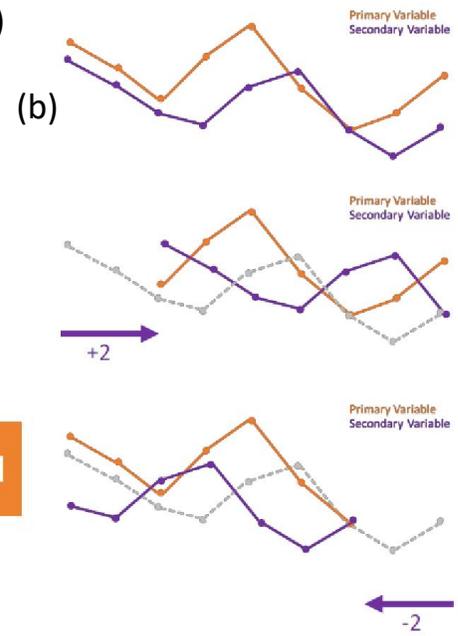
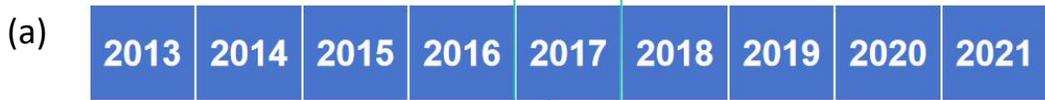


Рис11-(а),(b)Объяснение принципа метода скользящего окна;(с1)от 70 N до 90 N в 2021 году, чтобы показать изображения с отрицательным запаздыванием,Это можно интерпретировать как смещение потока скрытого тепла в сторону оси прошлого времени;(с2)от 70 N до 90 N в 2020 году, чтобы показать изображения с отрицательным запаздыванием, Это можно интерпретировать как смещение потока скрытого тепла на будущую временную ось;(d)Тенденции корреляции от 55,60,65,70 до 90 с.ш. и через моря в 2019 году,тенденция корреляции практически одинакова во всех широтных диапазонах на протяжении многих лет.

# Обсуждение результатов: пространственная локализация

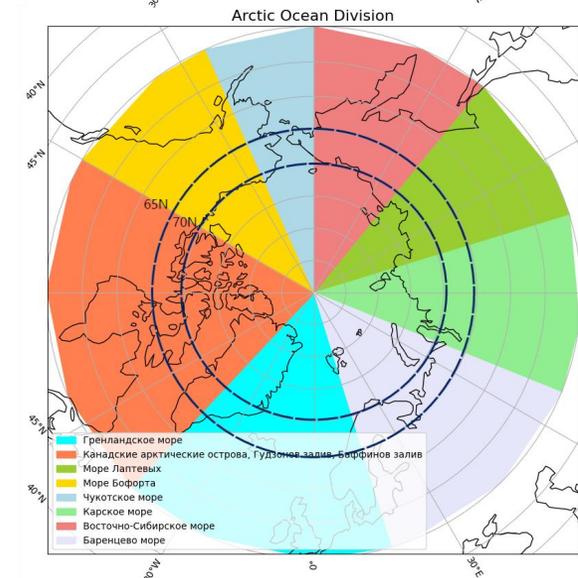
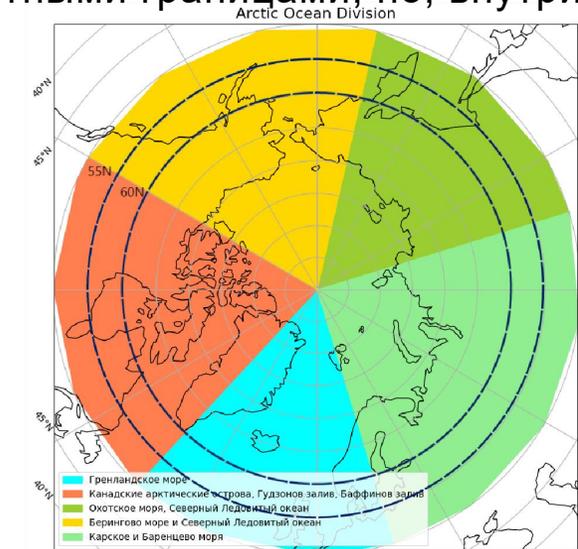
По нашему предположению длиннопериодические гармоники в переносе скрытого тепла должны влиять на состояние всего ледяного покрова Арктики, а короткопериодические – оказывать региональное или локальное воздействие. Поэтому в дальнейшем мы планируем дополнительно проводить анализ для акваторий отдельных морей Северного ледовитого океана. Для этого анализируемые ряды данных будут строиться не только для кругов с заданными широтными границами, но, внутри них, для секторов с заданными границами по долготе.

## 55N-90N,60N-90N

- Гренландское море (317E-0-17E)
- Карское и Баренцево моря(17E-107E)
- Охотское моря, Северный Ледовитый океан (107E-167E)
- Берингово море и Северный Ледовитый океан (167E-240E)
- Канадские острова,Гудзонов залив,Баффинов залив/Лабрадорское море (240E-317E)

## 65N-90N,70N-90N

- Гренландское море (317E-0-17E)
- Баренцево море (17E-68E)
- Карское море(68E-107E)
- Море Лаптевых (107E-141E)
- Восточно-Сибирское море (141E–180E)
- Чукотское море (180E-204E)
- Море Бофорта (204E-240E)
- Канадские арктические острова, Гудзонов залив, Баффинов залив (240–317E)



- Предложена методика расчета и совместного анализа рядов данных, характеризующих состояние ледяного покрова Арктики и меридионального переноса атмосферного скрытого тепла в высокие широты.
- На основе предложенной методики проанализированы данные за интервал с 2013 по 2021 годы. Показано, что многолетняя динамика суммарной сплоченности ледяного покрова Арктики и переноса скрытого тепла в высокие широты содержит проявления процессов одинаковых периодов (кроме годового наиболее выражены шести-, четырех-, трехмесячные) с почти постоянной разностью фаз.
- Выявленная особенность построенных рядов данных позволяет предположить наличие достаточно сильной, причинно-обусловленной связи этих рядов. Уточнение параметров этой связи открывает перспективу построения эмпирических прогностических моделей для предсказания сроков разрушения ледяного покрова отдельных акваторий Северного ледовитого океана, состояния Северного морского пути, ожидаемых минимумов/максимумов общей площади ледяного покрова.
- Дальнейшие перспективы исследования связаны с внедрением более сложных методик совместного анализа рядов данных, а также с переходом на более детальную пространственную сегментацию.

A wide-angle photograph of a snowy road stretching into the distance under a dramatic sunset sky. The sun is low on the horizon, casting a warm glow through the clouds. A small car is visible in the distance on the road. The right side of the road is lined with evergreen trees. The overall mood is serene and quiet.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ