

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

***МАМАДЖАНИЯ Анна Геворковна***

**Выпускная квалификационная работа**

***Сезонная и межгодовая изменчивость потоков тепла на границе океан-атмосфера в северной части Атлантического океана и Северо-Европейском бассейне Северного Ледовитого океана***

Бакалавриат

Направление подготовки 05.03.04 «Гидрометеорология»

Профиль «Океанология»

Научный руководитель:

доцент, к.г.н. Башмачников И.Л.

Рецензент:

Директор, фонд «Нансен Центр»

к.ф.-м.н. Бобылев Л.П.

Санкт-Петербург

2019 год

## Оглавление

Введение .....	4
Актуальность работы .....	4
Цель работы.....	4
Задачи работы .....	4
Глава I. Физико-географическое описание региона.....	6
Глава II. Материалы и методы.....	8
ICOADS .....	8
ERA-Interim и ERA5 .....	9
OAFflux .....	9
ARMOR-3D .....	10
Методы обработки данных .....	11
Ссылки на источники данных: .....	12
Глава III. Сравнение потоков тепла на границе океан-атмосфера по различным базам данных .....	13
Временной ход .....	14
Сезонная изменчивость .....	19
Межгодовая изменчивость.....	26
Глава IV. Межгодовая изменчивость океанических и атмосферных потоков тепла в акваториях Северо-Европейского бассейна СЛО .....	31
Межгодовая изменчивость.....	32
Выводы .....	36
Благодарности .....	38
Список литературы.....	39
Приложения.....	41
Приложение 1 .....	41
Приложение 2.....	42
Приложение 3.....	43

Приложение 4.....	44
Приложение 5.....	45
Приложение 6.....	46
Приложение 7.....	47
Приложение 8.....	48

# Введение

## *Актуальность работы*

Взаимодействие океана и атмосферы является одной из важнейших составляющих климатической системы, которая во многом определяет как погоду и климат, так и тепловой и динамический режим Мирового океана. Изучение характера этого взаимодействия открывает пути для разработки более совершенных долгосрочных методов прогноза погоды, прогноза изменений климата и динамического режима Мирового океана.

Средняя циркуляция океана и атмосферы генерируются единым источником энергии - солнечным излучением - и представляют собой компоненты единого механизма, в котором происходит трансформация тепловой энергии Солнца в другие виды энергии. Тепловое и динамическое взаимодействие, обмен влагой являются основными процессами во взаимодействии океана и атмосферы. В накоплении тепла и формировании градиентов атмосферного давления океан играет ведущую роль, так как способен аккумулировать большие запасы тепла, а атмосфера более активна в динамическом смысле - в силу большей подвижности среды и больших значений кинетической энергии.

В данной работе будут рассматриваться вертикальные потоки тепла (скрытого и явного) на границе океан-атмосфера. Поток скрытого тепла связан с испарением воды с поверхности океана. Поток явного тепла обусловлен контактным турбулентным теплообменом. Потоки атмосферного тепла в северной части Атлантики и Северном Ледовитом океане (СЛО) в среднем за год направлены из океана в атмосферу. Этот отток тепла в атмосферу компенсируется притоком океанического тепла с течениями из субтропиков и локальным радиационным балансом акваторий. Эти вопросы тоже были рассмотрены в работе.

**Цель работы:** выявить характер сезонной и межгодовой изменчивости атмосферных потоков тепла в северной части Атлантического океана и Северо-Европейского бассейна СЛО по нескольким базам данных, и определить их роль в изменчивости теплосодержания верхнего слоя океана.

## **Задачи работы:**

1. Определить особенности сезонной изменчивости скрытых и явных потоков тепла в районах исследований по нескольким базам реанализов и натурных измерений;
2. Определить особенности межгодовой изменчивости скрытых и явных потоков тепла в районах исследований по нескольким базам реанализов и натурных измерений;

3. Оценить роль вертикальных потоков тепла в изменчивости теплосодержания верхнего слоя восточной части Северо-Европейского бассейна СЛО.

## Глава I. Физико-географическое описание региона

Вертикальные потоки тепла на границе океан-атмосфера зависят, в числе других факторов, от температуры поверхности моря, которая в северной Атлантике, во многом определяется направлением переноса тепла океаническими течениями. Поверхностные течения Атлантического океана (рис. 1) в основном формируются системой преобладающих ветров (с учетом конфигурации границ океана), а также региональными особенностями теплового и водного балансов поверхности моря, формирующих градиенты давления в верхнем слое океана.

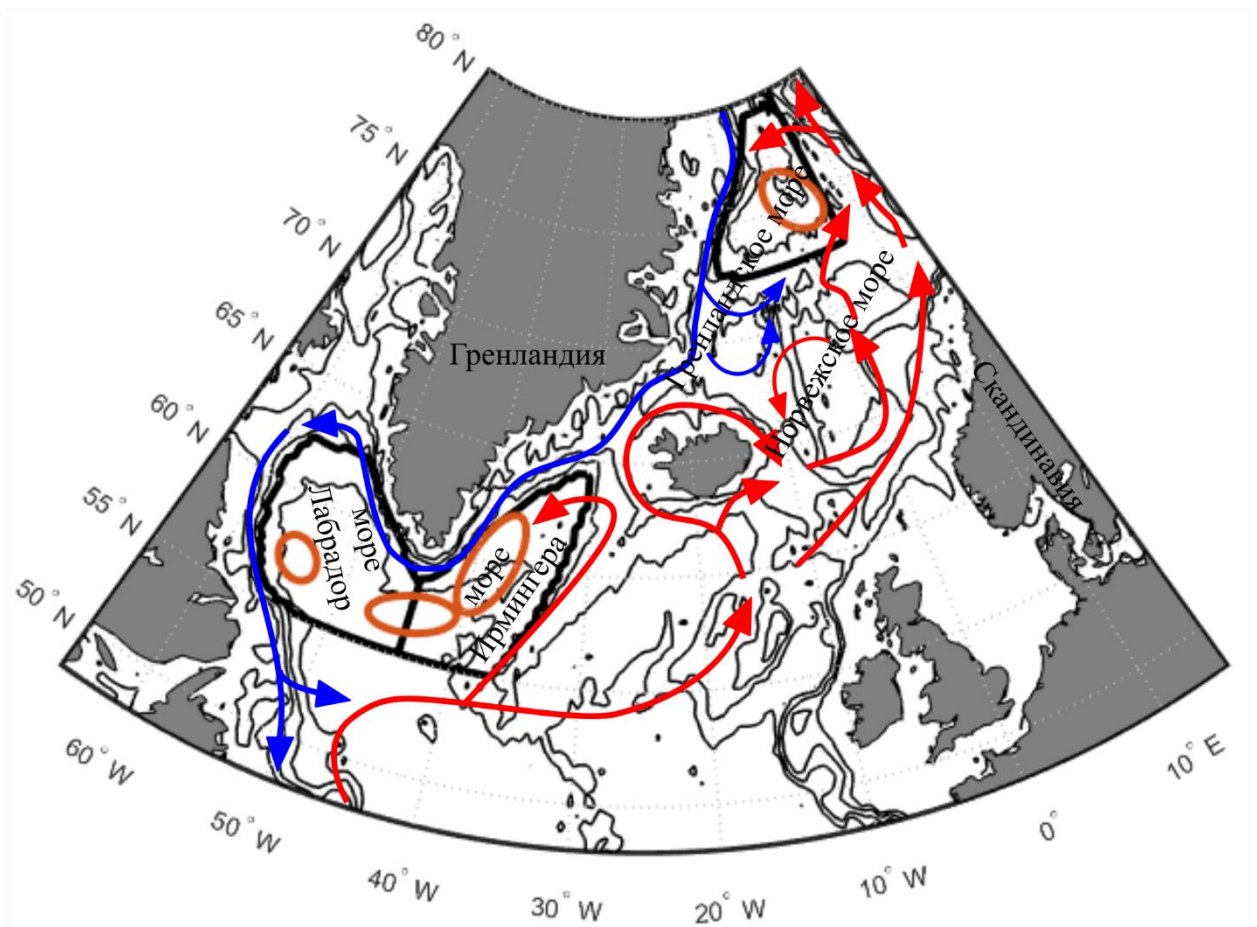


Рис. 1 Карта основных поверхностных тёплых (красные) и холодных (синие) течений в северной Атлантике. (карта предоставлена Яковлевой Д.)

В Северной Атлантике Гольфстрим и его продолжение – Северо-Атлантическое и Норвежское течения, несут теплую воду к побережью Норвегии, где порты остаются свободными от льда даже на 71° с.ш. Знание межгодовой изменчивости меридионального переноса тепла океаническими течениями, а также характера теплообмена океана и атмосферы в субполярных широтах имеет большое значение для оценки механизмов переноса тепла в высокие широты в Северном полушарии (Nilsen, Falck, 2006).

Атлантическая вода (АВ, -  $T \geq 3^{\circ}\text{C}$  и  $S \sim 35$ ) поступает в Норвежское море через Фарерско-Шетландский канал и через хребет Исландия-Фарерские острова (Hansen and Østerhus, 2000) и продолжает двигаться на север в Северный Ледовитый океан в виде Норвежского течения (рис. 1). В Норвежском море Норвежское течение разделено на две ветви: восточная ветвь проходит вдоль Норвежского континентального склона и имеет значительную баротропную составляющую, западная ветвь проходит вдоль линии подводных хребтов на западе Норвежского моря, вдоль изобаты 2000 м, и существенно бароклинна и менее стабильна (Orvik & Niiler, 2002). В Норвежском море существенные объемы АВ наблюдаются между двумя ветвями. Нижняя граница АВ обычно встречается на глубинах около 400-500 м (Helland-Hansen & Nansen, 1909; Orvik; et al., 2001).

Западная ветвь Норвежского течения, где АВ встречается с холодной и распреснённой Арктической водой, приурочена к Арктическому фронту. Это область с сильными горизонтальными градиентами. Этот фронт довольно устойчив к северу от о. Ян-Майен, но в южной части Норвежского моря часто регистрируются относительно большие сдвиги в его положении из-за изменчивости объема Арктических вод, переносимых Восточно-Исландским течением.

В верхнем слое Норвежского моря преобладают теплые и соленые АВ (Mosby, 1970), в то время как глубокие слои заполнены Норвежскими глубинными водами – довольно однородной водной массой как по температуре, так и по солености (Mosby, 1959). Между этими двумя водными массами присутствует Арктическая промежуточная вода (АПВ), которая обычно находится на глубине 500–800 м в Норвежском бассейне и 800–1200 м в бассейне Лофотенских островов. Она формируется к западу от Арктического фронта (Blindheim, 1990). Sælen (1963) и Mosby (1970) показали, что в Норвежском море иногда присутствуют вихревые элементы с масштабами порядка 50 км. Эти вихри могут оставаться неподвижными в течение нескольких дней или перемещаться с различной скоростью в северо-восточном направлении (Sælen, 1963). Такие вихревые особенности связаны с сильными горизонтальными и вертикальными градиентами температуры и могут вносить значительный вклад в синоптические изменения температуры и глубины переходного слоя.

На  $67^{\circ}$  с.ш. Норвежское течение разделяется на 2 ветви: Нордкапское течение (направлено на восток в Баренцево море) и Шпицбергенское течение (направлено на север вдоль западного побережья острова Шпицберген) (Helland-Hansen & Nansen, 1909). Средний расход и потоки тепла АВ, переносимые каждой ветвью Норвежского течения, составляют в районе разреза Свиной около 4 Св и 126 ТВт, соответственно, а на входе в Баренцево море - в среднем 2 Св и 48 ТВт, соответственно (Skagseth et al., 2008; Smerdsrud et al., 2013).

## Глава II. Материалы и методы

В главе III проводится сравнение значений скрытых и явных потоков тепла трёх баз данных. В работе использованы данные реанализов OAFlux (Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes) и ERA-Interim с данными наблюдений ICOADS (The International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set). Район исследований – это северная Атлантика и Северо-Европейский бассейн СЛО между 54 и 67°с.ш.

В главе IV для оценки компонентов баланса тепла Северо-Европейского бассейна СЛО. Для этого были использованы вертикальные потоки тепла из океана в атмосферу (скрытые и явные, по данным реанализа OAFlux), горизонтальные океанические потоки тепла и теплосодержание до глубины 500 метров (по данным ARMOR-3D1), а также сумму длинноволновой и коротковолновой радиации (по данным реанализа ERA5).

### ICOADS

В базу данных ICOADS собраны данные точечных in-situ попутных судовых наблюдений, наблюдений кораблей погоды и метеобуев. Расчет потоков тепла проводится градиентным методом.

В ICOADS приводятся среднемесячные значения на регулярной сетке 1x1°. Для валидации нами была сделана выборка лишь тех ячеек, где количество наблюдений (зарегистрированное в базе данных) превышало 120 в месяц, что значит 4 в день. Используемые этих данных включают в себя информацию о суточном ходе, и средимесячные значения рассчитаны корректно. В базе ICOADS дается не непосредственно поток тепла, а градиент температуры между поверхностью и уровнем 10 м или влажность воздуха, умноженные на скорость ветра на высоте 10 м (далее - sflx или lflx, соответственно). Подразумевается прямая пропорциональность между коэффициентом турбулентного обмена и скоростью ветра над взволнованной водной поверхностью (Smith, 1988).

Для получения значений потоков тепла использовались следующие формулы (Huang et al., 2009):

1.  $F_s = C_s * \rho_a * C_{pa} * sflx(i, j, k)$  – для явного потока тепла;
2.  $F_l = (0.622/slp(i, j, k)) * C_l * \rho_a * L_{va} * lflx(i, j, k)$  – для скрытого потока тепла.

Здесь:

- sflx и lflx – данные из базы ICOADS для явного и скрытого потоков тепла, соответственно:



- $sflx = U_z(T_0 - T_z)$ , где  $U_z$  – скорость ветра на высоте  $z = 10$  м,  $T_0$  – температура поверхности моря,  $T_z$  – температура воздуха на высоте  $z = 10$  м,
- $lflx = U_z(Q_0 - Q_z)$ , где  $U_z$  – скорость ветра на высоте  $z = 10$  м,  $Q_0$  – влажность у поверхности моря,  $Q_z$  – температура воздуха на высоте  $z = 10$  м;
- $slp = (slp_0 * 0.01) + 1197.65$  [гПа] – давление на уровне моря;
- $C_s = C_l = 1.3e^{-3}$  – эмпирические коэффициенты интенсивности теплообмена;
- $\rho_a = 1.25$  [кг/м<sup>3</sup>] – плотность воздуха;
- $C_{pa} = 1003$  [Дж/кг\*град] – теплоёмкость воздуха при постоянном давлении;
- $L_{va} = 2.453e^6$  [Дж/кг] – скрытая теплота испарения;

В этой работе, для расчёта давления на уровне моря было использовано характерное значение  $slp_0 = 1000$  гПа.

### ***ERA-Interim и ERA5***

Реанализ Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) ERA-Interim ставит задачу обобщения глобальной сети метеорологического мониторинга на основе системы четырехмерного усвоения (4D-Var) с 1979г. по настоящее время. Система усвоения, которая используется для подготовки реанализа ERA-Interim, включает все возможные источники метеорологической информации для морской поверхности. ERA-Interim турбулентность описывает по-разному для приводного и пограничного слоев. В приводном слое (куда входит нижний модельный уровень) используется турбулентное замыкание первого порядка с явным учетом влияния стратификации через параметр устойчивости. В настоящее время реанализ ERA-Interim используется совместно с его новейшей версией реанализа ERA5, используемой в работе.

### ***OAFlux***

OAFlux предоставляет собой массив глобальных среднемесячных полей вертикальных потоков явного и скрытого тепла для всего Мирового океана, свободного от ледового покрова, с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  с 1958г (Lisan Yu, et. al, 2008). Имеются также среднесуточные данные с 1985 по 2006 годы. Потоки рассчитываются по градиентным формулам с использованием современного алгоритма COARE bulk algorithm 3.0. Входными данными являются спутниковые данные характеристик поверхности океана и атмосферы, дополненные данными атмосферного реанализа NCEP (National Centers for

Environmental Prediction) и ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts в областях, где наблюдения отсутствуют. Спутниковые данные, используемые в модели, включают данные о скорости ветра, температуре поверхности океана (ТПО), а также влажности воздуха в приводном слое (см. таблицу 2.1).

*Таблица 2.1. Основные характеристики, используемые в массиве OAFIux*

Параметр	Инструмент/спутник
Скорость ветра	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Микроволновый радиометр SSMI (Special Sensor Microwave Imager)</li> <li>• Микроволновый радиометр AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System)</li> <li>• Скаттерометр Quik SCAT (Quick Scatterometer)</li> </ul>
ТПО	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NOAA OI (National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation): <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Радиометр AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)</li> <li>○ Микроволновый радиометр AMSR-E</li> </ul> </li> </ul>
Влажность воздуха в приводном слое	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Микроволновый радиометр SSMI (Special Sensor Microwave Imager)</li> </ul>

### ***ARMOR-3D***

ARMOR-3D – массив данных комбинированных in-situ и спутниковых наблюдений. В этом массиве приведены среднемесячные значения термohалинных характеристик на регулярной сетке с горизонтальным разрешением  $1/4^\circ$ , на стандартных океанографических горизонтах с 1993 года, что обусловлено началом качественных наблюдений спутниковых альтиметров (Larnicol et. al, 2006; Nardelli et. al, 2012). Основные источники данных, используемых в этом массиве, описаны в таблице 2.2.

*Таблица 2.2 Основные характеристики, используемые в массиве ARMOR-3D*

Параметр	Источник
ТПО (температура верхнего перемешанного слоя)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• спутниковые и натурные наблюдения реанализа Reynolds с пространственным разрешением <math>1^\circ</math></li> </ul>

Температура и солёность (на разных горизонтах)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• буи ARGO</li> <li>• CTD-зонды</li> <li>• батитермографов XBT</li> <li>• метеобуи</li> <li>• другие платформы (данные из базы наблюдений the World Ocean Data Base, а также другие массивы)</li> </ul>
Аномалии уровня моря	<ul style="list-style-type: none"> <li>• спутниковая альтиметрия с пространственным разрешением 1/4° (the SSALTO/DUACS center)</li> </ul>

Для расчёта горизонтальных потоков тепла верхнего слоя океана (до 500 м) через разрез мы использовали стандартную формулу:

$$Q = \int_0^z \int_0^L C_p \rho u (T - T_{ref}) dl dz$$

где  $\rho = 1027 \text{ кг/м}^3$  — плотность воды,  $C_p = 3900 \text{ (Дж/кг}^\circ\text{C)}$  — удельная теплоемкость воды,  $u$  — скорость потока перпендикулярная разрезу, м/с,  $T$  — температура воды,  $^\circ\text{C}$ ;  $dz$  — глубина слоя, м,  $dl$  — длина разреза, м. В качестве базовой температуры ( $T_{ref}$ ) бралась температура замерзания морской воды, равная  $-1,8^\circ\text{C}$ .

Для расчета теплосодержания верхнего слоя океана мы использовали стандартную формулу (Björk et al., 2001):

$$Q = \int_0^z \rho C_p (T - T_{ref}) dz$$

где  $\rho = 1027 \text{ кг/м}^3$  — плотность воды,  $C_p = 3900 \text{ (Дж/кг}^\circ\text{C)}$  — удельная теплоемкость воды,  $T$  — температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $dz$  — толщина слоя, м. В качестве базовой температуры ( $T_{ref}$ ) бралась температура замерзания морской воды, равная  $-1,8^\circ\text{C}$ .

### ***Методы обработки данных***

Для построения графиков и проведения всех необходимых расчётов использовалась программа MATLAB (“Matrix Laboratory”).

В первой части работы помимо временного хода значений для лучшего анализа сезонной изменчивости был рассчитан и визуализирован средний годовой ход для каждого выбранного региона отдельно. Также были рассчитаны корреляции между: ICOADS и OAFlux, ICOADS и ERA-Interim, OAFlux и ERA-Interim; и получены среднеквадратические

ошибки моделей по сравнению с наблюдениями. Для оценки согласованности характера сезонной и межгодовой изменчивости различных баз данных были применены вейвлет и кросс-вейвлет анализы.

Для расчёта роли атмосферного теплообмена в общем балансе потоков тепла в 4 главе, также был построен среднегодовое течение потоков тепла. Отдельно был рассчитан баланс океанических потоков тепла, радиационный баланс, а также аккумулятивная дивергенция потоков тепла с учётом всех рассчитанных составляющих теплового баланса.

***Ссылки на источники данных:***

ICOADS <http://icoads.noaa.gov/>

OAFflux <http://oafux.who.edu/>

ERA-Interim <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>

ERA5 <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=form>

### Глава III. Сравнение потоков тепла на границе океан-атмосфера по различным базам данных

Карта расположения регионов, по которым проводилось сравнение, с обозначенным положением кораблей погоды приводится на рисунке 3.1. Для сравнения реанализов отбирались точки, в которых измерения проводились с 1980 года, так как ERA-Interim воспроизводит значения начиная с этого года. Однако особый интерес представляли значения с кораблей погоды, которые проводили измерения на протяжении долгого периода времени в одной точке. Для анализа использовались только точки, где проводилось не менее 4 измерений в сутки (порядка 120 измерений за месяц). Корабли погоды Альфа (Alpha) и Браво (Bravo) проводили измерения до 1980 года, поэтому для их значений приведено сравнение только с OAFflux.

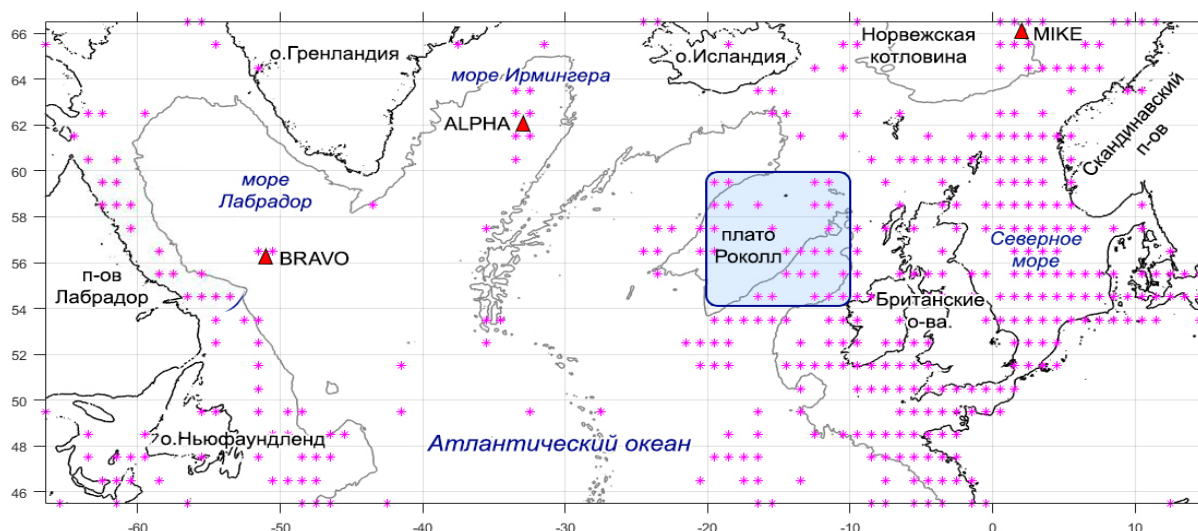


Рис. 3.1 Карта-схема расположение кораблей погоды и буев базы ICOADS, использованных для оценки качества воспроизведения потоков тепла в северной Атлантике данными реанализов. Треугольниками показаны корабли погоды, голубым цветом – область в районе плато Роколл (далее плато Роколл)

Для периода наблюдений после 1980г., данные были получены для двух областей исследования: корабль погоды Майк и район плато Роколл, были проведены сравнения двух реанализов и натурных измерений. Длина ряда наблюдений в районе плато Роколл – 21 год и на корабле погоды Майк – 31 год.

### Временной ход

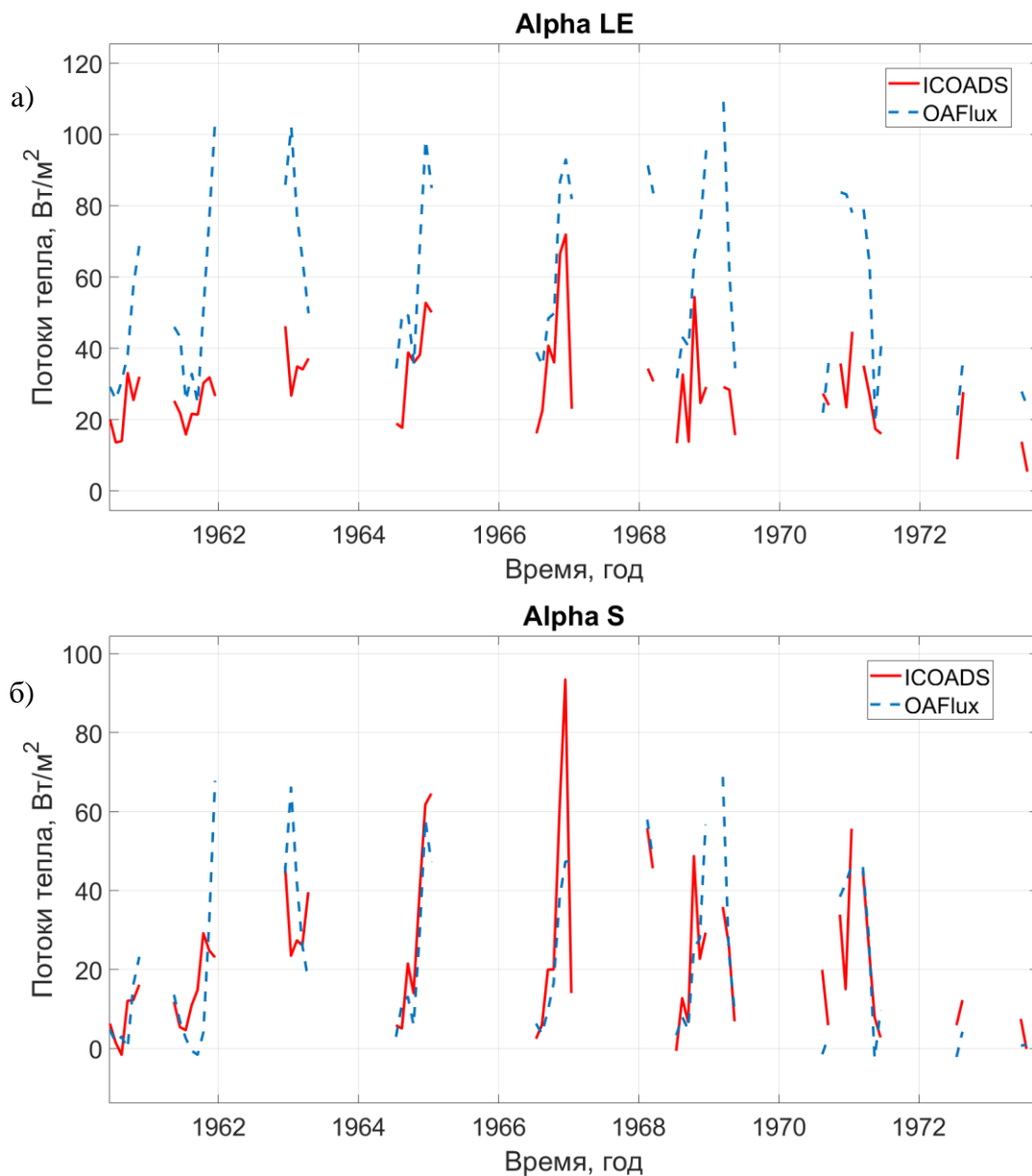


Рис.3.2 Графики временного хода: а) скрытых (LE), б) явных (S) потоков тепла для корабля погоды Альфа (Alpha). Красная сплошная кривая – данные ICOADS, синяя пунктирная кривая – данные OAFlux.

Как видно на рисунке 3.2 ряд данных для корабля погоды Альфа очень не однороден, имеется большое количество пропусков, измерения проводились не регулярно или с недостаточной частотой (выборка содержит только те среднемесячные значения, которые рассчитаны из минимум 120 измерений в месяц). Также пропуски в измерениях можно объяснить сложными погодными и ледовыми условиями в регионе, однако ряд данных для корабля погоды Браво, расположенного в море Лабрадор, более постоянный (см. рис. 3.3).

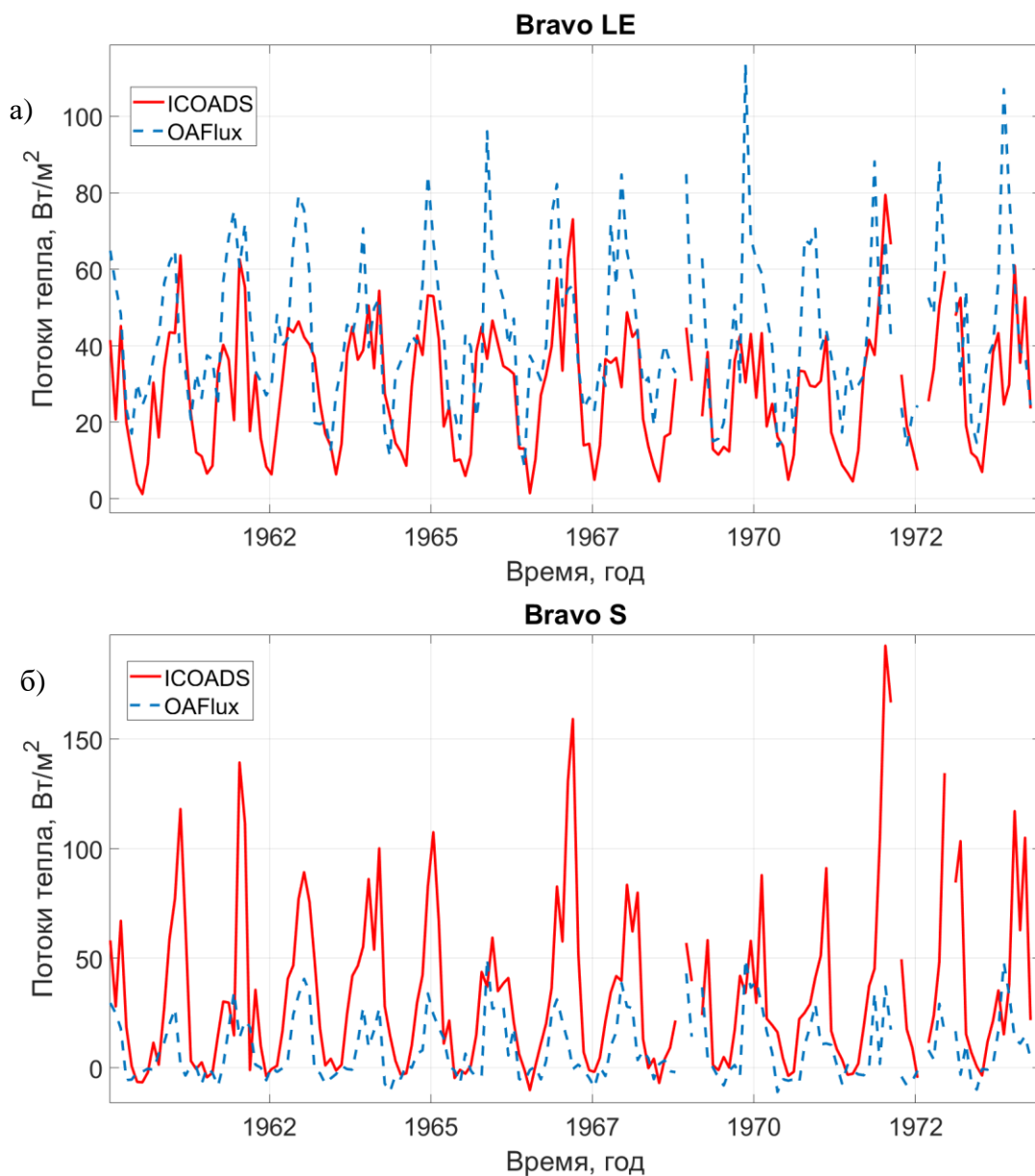


Рис. 3.3 Графики временного хода: а) скрытых (LE), б) явных (S) потоков тепла для корабля погоды Браво (Bravo). Красная сплошная кривая – данные ICOADS, синяя пунктирная кривая – данные OAFflux.

По графикам временного хода изменения вертикальных потоков тепла на станциях Альфа (рис. 3.2) и Браво (рис. 3.3) по данным ICOADS и соответствующим им данным OAFflux видно, что для скрытого потока тепла OAFflux, как правило, завышает значения потоков, а для явного – наоборот занижает значения потоков. Однако можно сказать, что в целом OAFflux хорошо повторяет ход наблюдаемых значений.

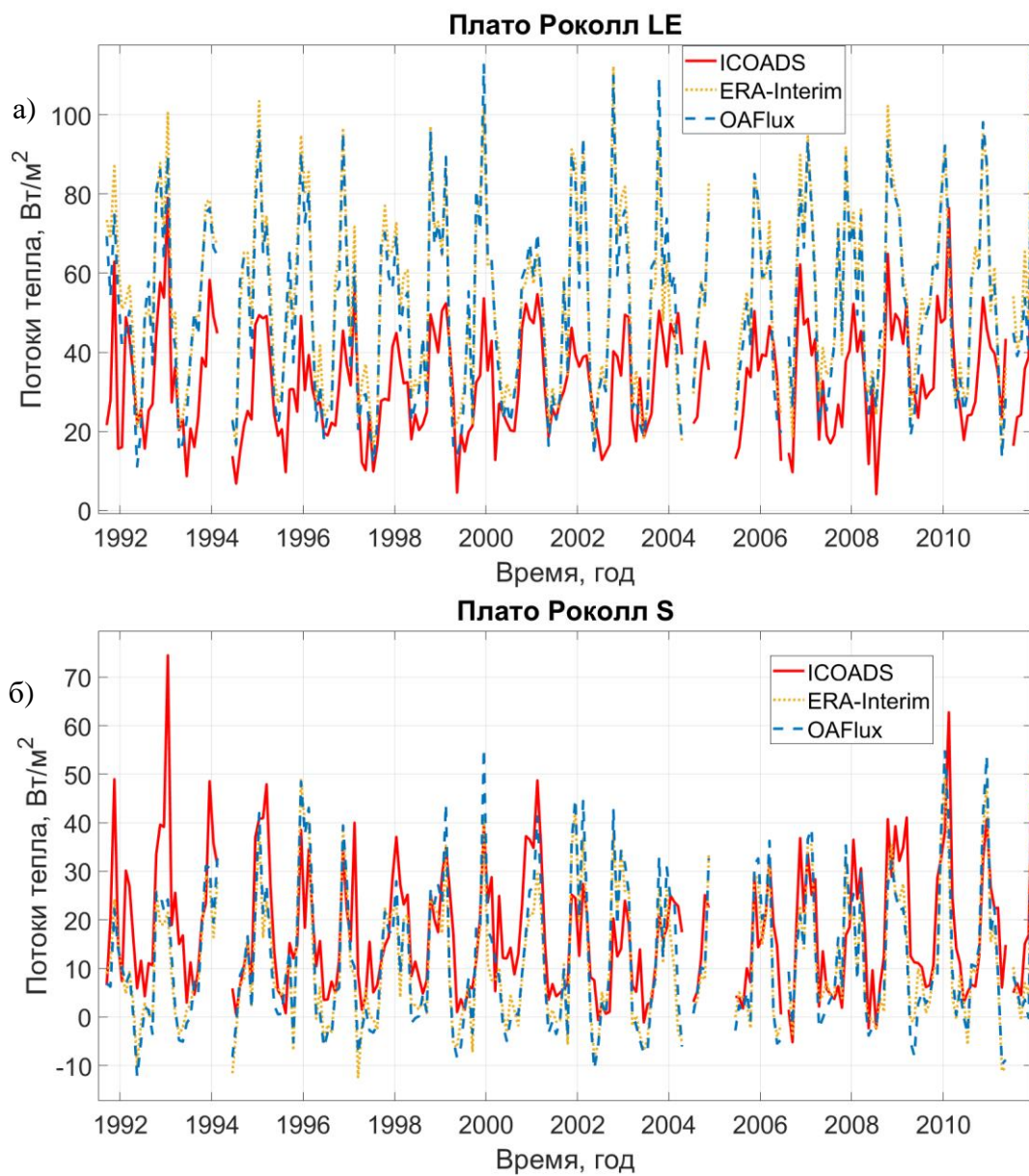


Рис. 3.4 Графики временного хода: а) скрытых (LE), б) явных (S) потоков тепла для района плато Роколл. Красная сплошная кривая – данные ICOADS, синяя пунктирная кривая – данные OAFflux, жёлтая точечная кривая – данные ERA-Interim.



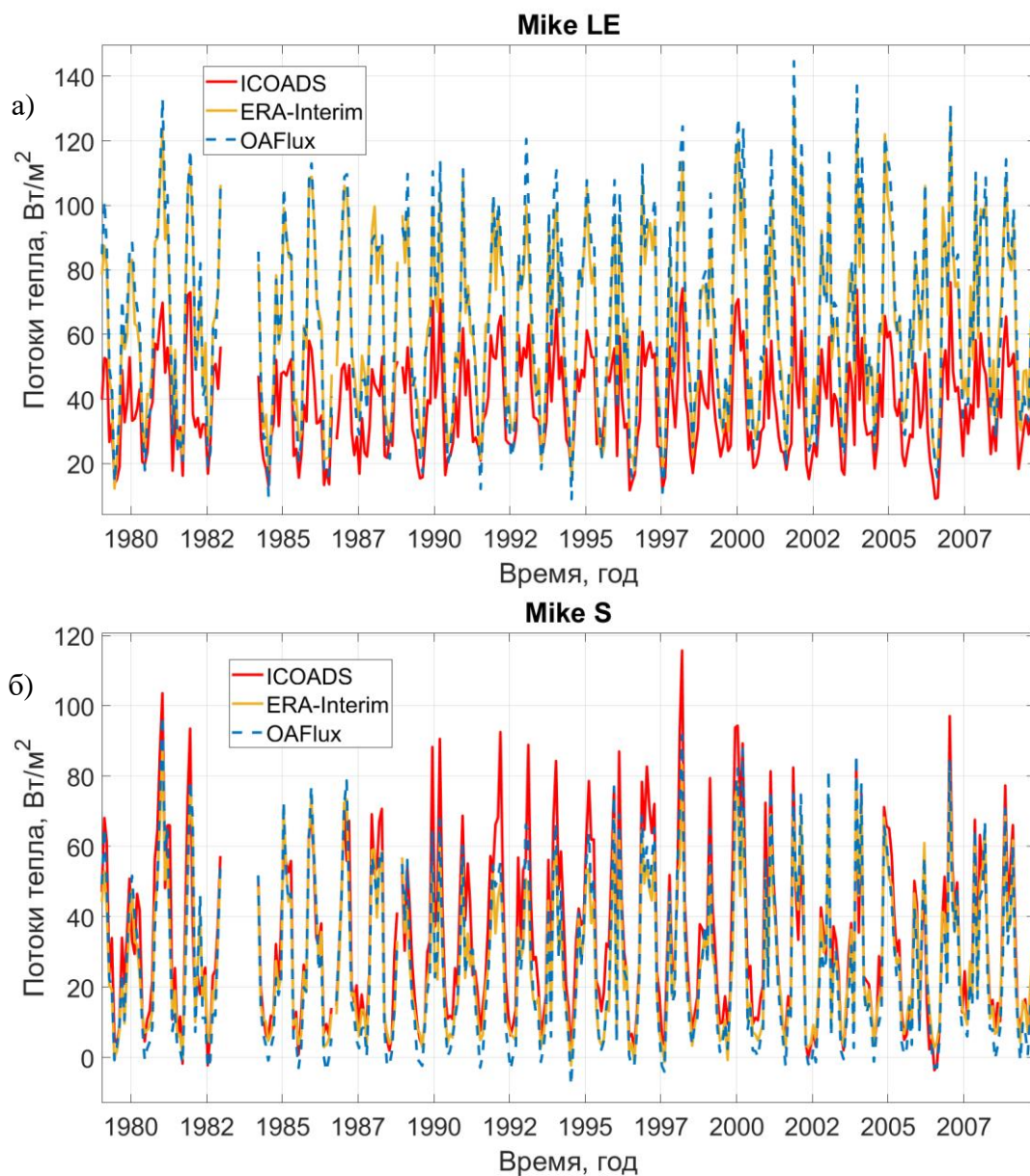


Рис. 3.5 Графики временного хода: а) скрытых (LE), б) явных (S) потоков тепла для корабля погоды Майк (Mike). Красная сплошная кривая – данные ICOADS, синяя пунктирная кривая – данные OAFlux, жёлтая точечная кривая – данные ERA-Interim.

Как это видно на графиках для района плато Роколл и станции Майк (рис. 3.4 и 3.5), ERA-Interim, как и OAFlux, завышает значения скрытых потоков тепла и занижает значения явных потоков тепла.

Табл. 3.1 Средние значения для скрытого и явного потока тепла по данным измерений и двух реанализов ( $Вт/м^2$ ).

Регион	Скрытый поток тепла			Явный поток тепла		
	ICOADS	OAFflux	ERA-Interim	ICOADS	OAFflux	ERA-Interim
Альфа	29,3	56,7	-	23,7	21,6	-
Браво	28,9	43,2	-	33,8	8,5	-
Майк	38,1	63,2	62,0	33,6	26,4	27,4
Плато Роколл	32,8	50,2	52,7	17,2	11,8	11,3

По таблице 3.1, в которой указаны средние значения потоков, можно определить, что в районе у п-ова Лабрадор доминируют явные потоки тепла, превышая скрытые в более чем 2 раза, а в регионе плато Роколл, наоборот, потоки скрытого тепла в 2 раза интенсивнее явного. В Майке доминирует, как и в плато Роколл, скрытые потоки тепла, но разница между скрытыми и явными не такая большая, а всего лишь составляет около  $4 \text{ Вт/м}^2$ . Резкое уменьшение относительной роли скрытых потоков тепла, доминирующих в низких широтах, к субполярным и полярным широтам, в общем балансе теплообмена океана и атмосферы, соответствует литературным данным.

## Сезонная изменчивость

Для значений корабля погоды Альфа графики среднемноголетней сезонной изменчивости скрытых и явных потоков тепла по данным ICOADS и OAFflux представлены в приложении 1. По графикам видно, что OAFflux хорошо повторяет сезонный ход, однако стоит учитывать высокую неоднородность этого временного ряда измерений (рис. 3.2), и потому осреднение в различные месяцы могло проводиться для различных лет.

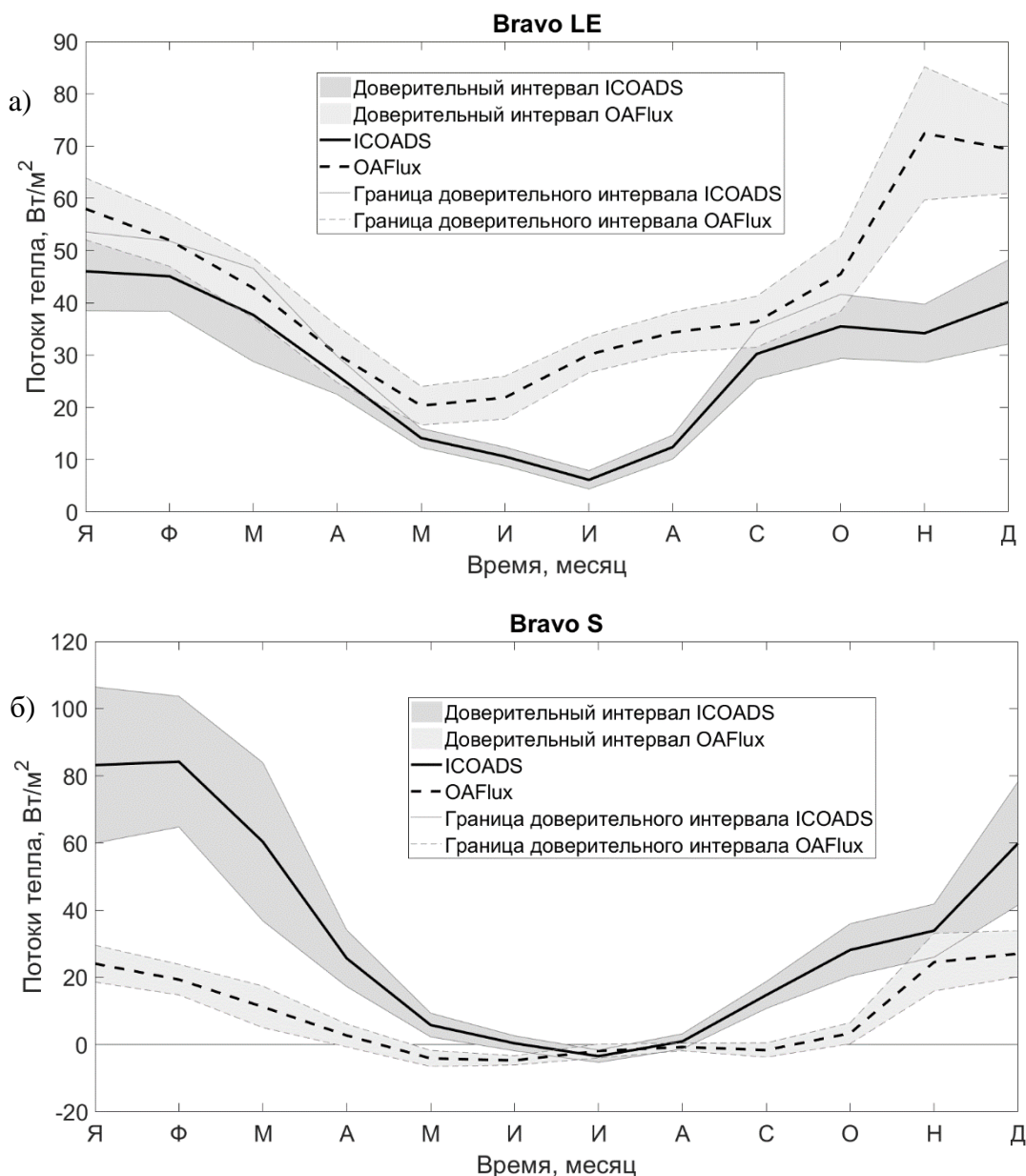


Рис. 3.6 Графики среднемноголетнего сезонного хода по наблюдениям на корабле погоды Браво (Bravo): а) скрытый поток тепла (LE), б) явный поток тепла (S). Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные OAFflux; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – OAFflux; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала OAFflux.

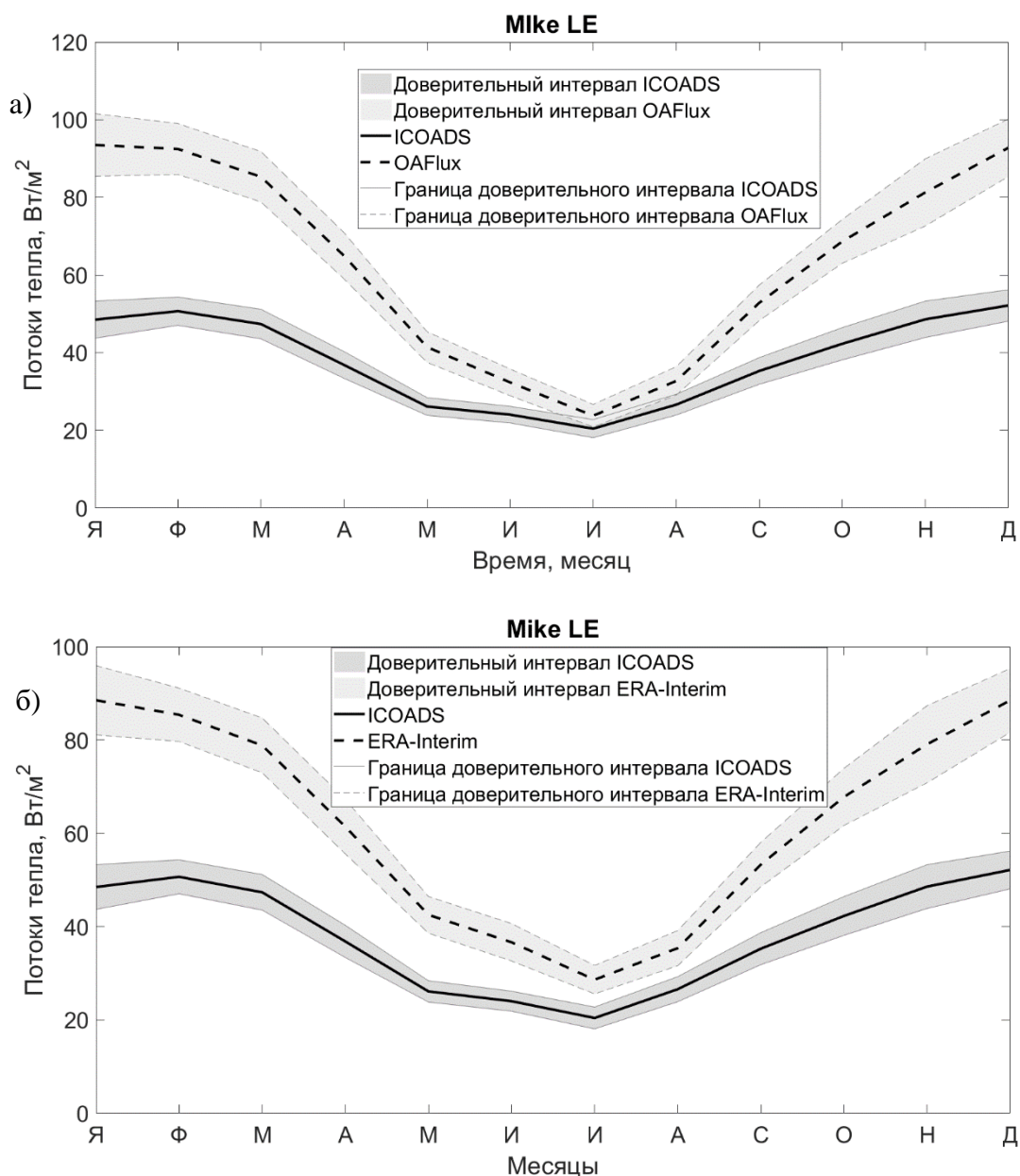


Рис. 3.7 Графики среднееголетнего сезонного хода по наблюдениям на корабле погоды Майк (Mike) для скрытого потока тепла (LE). а) Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные OAFlux; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – OAFlux; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала OAFlux. б) Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные ERA-Interim; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – ERA-Interim; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала ERA-Interim.

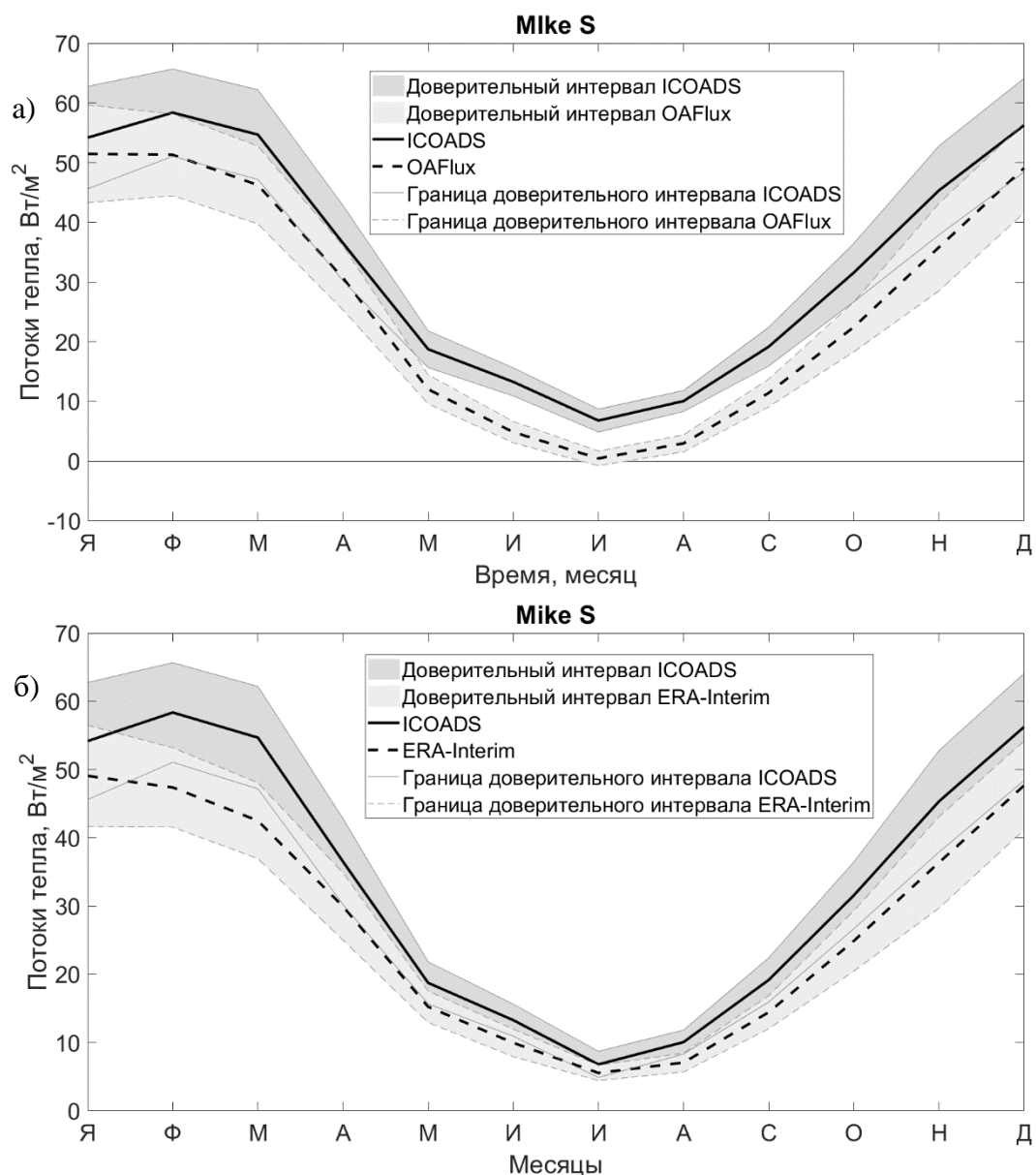


Рис.3.8 Графики среднемноголетнего сезонного хода по наблюдениям на корабле погоды Майк (Mike) для явного потока тепла ( $S$ ). а) Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные OAFflux; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – OAFflux; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала OAFflux. б) Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные ERA-Interim; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – ERA-Interim; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала ERA-Interim.



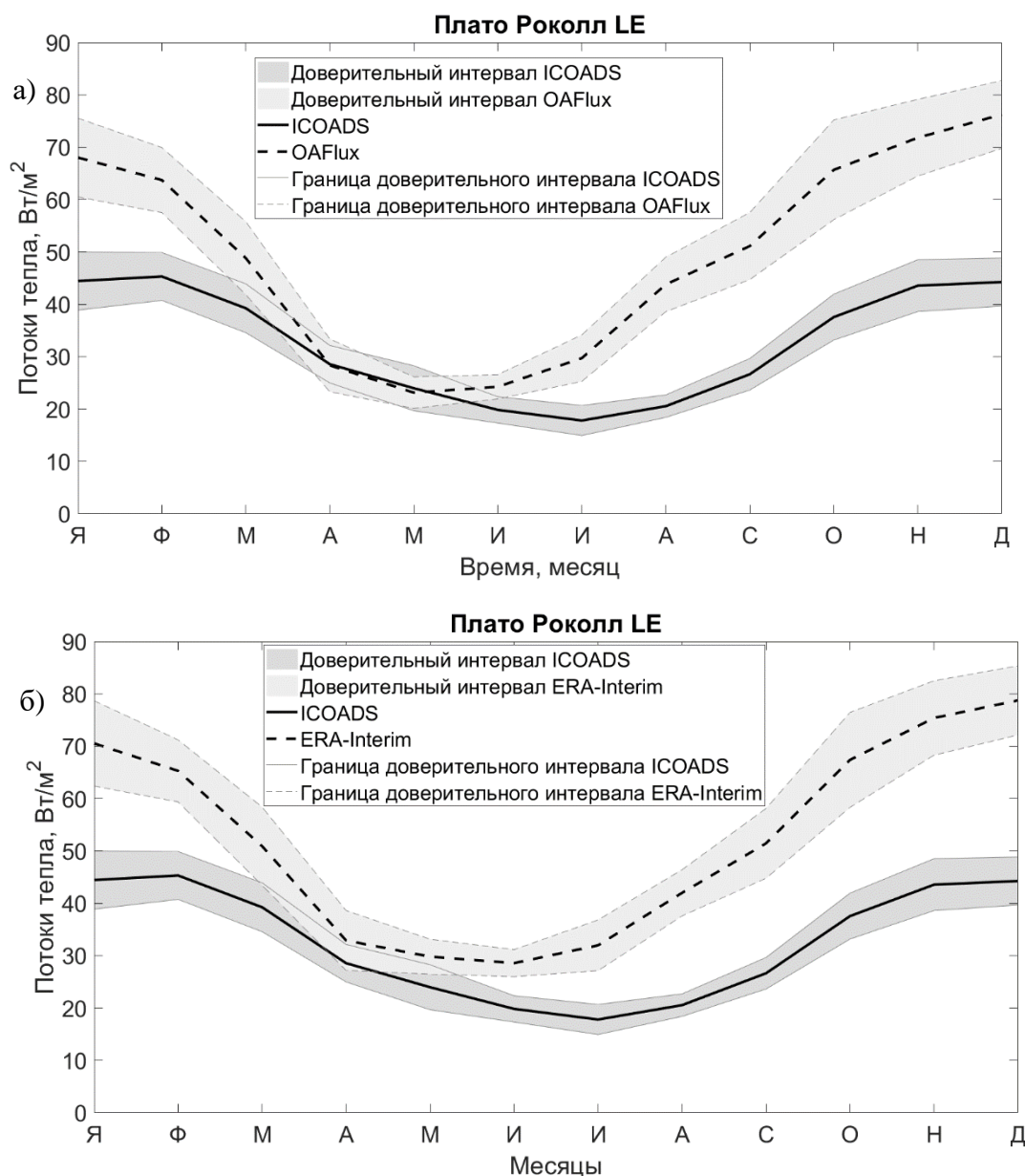


Рис. 3.9 Графики среднегодового сезонного хода по наблюдениям в районе плато Роколл для скрытого потока тепла (LE). а) Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные OAFflux; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – OAFflux; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала OAFflux. б) Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные ERA-Interim; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – ERA-Interim; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала ERA-Interim.

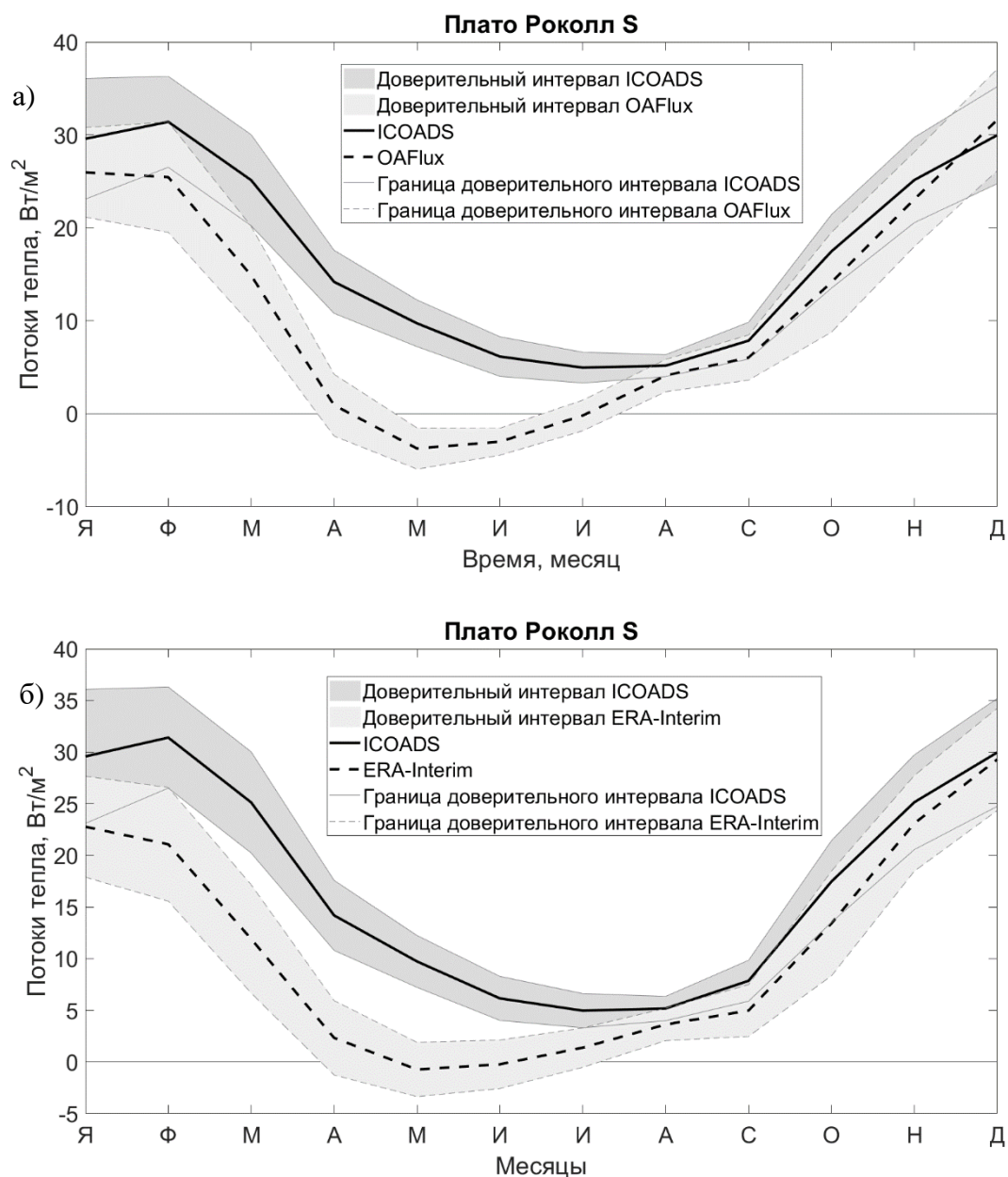


Рис. 3.10 Графики среднесезонного сезонного хода по наблюдениям в районе плато Роколл для явного потока тепла ( $S$ ). а) Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные OAF flux; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – OAF flux; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала OAF flux. б) Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные ERA-Interim; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – ERA-Interim; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала ERA-Interim.

Среднесезонный сезонный ход, по данным с кораблей погоды Браво и Майк и региона плато Роколл, имеет выраженную структуру с увеличением значений потоков из

океана в атмосферу в зимний период, что связано с быстрым выхолаживанием атмосферы в зимнее время и большей теплоёмкостью воды (рис. 2.3 – 2.6). Годовые амплитуды потоков скрытого тепла составляют примерно 50-60 Вт/м<sup>2</sup>, а у потоков явного тепла амплитуда для разных районов измерений значительно отличается: так по данным корабля Браво годовая амплитуда составляет примерно 80 Вт/м<sup>2</sup>, на станции Майк – 50 Вт/м<sup>2</sup>, а в районе плато Роколл – примерно 25 Вт/м<sup>2</sup>.

На графиках среднемноголетнего сезонного хода (рис. 3.6 – 3.10) также хорошо видно, что OAFflux и ERA-Interim хорошо коррелируют между собой. Коэффициент корреляции для сравнения значений реанализов составляет от 0,96 до 0,98, что может быть связано с тем, что начальные данные, по которым модели рассчитывают потоки тепла, берутся из одних источников.

*Табл. 3.3 Значение коэффициентов корреляции между среднегодовыми данными ICOADS и реанализами для всех районов исследования по исходным данным.*

Регион	Скрытый поток тепла		Явный поток тепла	
	OAFflux	ERA-Interim	OAFflux	ERA-Interim
Альфа	0,61	-	0,66	-
Браво	0,54	-	0,48	-
Майк	0,93	0,92	0,95	0,93
Плато Роколл	0,70	0,70	0,73	0,71

Для выявления статистической связи между рядами наблюдений и реанализов были рассчитаны коэффициенты линейной корреляции между рядами ICOADS и рядами OAFflux и ERA-Interim по среднемесячным значениям (табл. 3.3). Значения коэффициента корреляции ICOADS и OAFflux для станций Альфа и Браво составляют 0,5- 0,6 для скрытого и явного потока тепла, соответственно. значения реанализов хорошо коррелируют с данными измерений. Наиболее высокие показатели корреляции реанализов с данными наблюдений отмечены для корабля погоды Майк и составляют порядка 0,9, и для OAFflux, и для ERA-Interim. Для района плато Роколл значения коэффициентов корреляции составляют в среднем 0,7.

По таблице 3.4 можно определить, что среднеквадратические ошибки для скрытого потока тепла, как правило, больше, чем для явного потока тепла для обоих реанализов. Минимальные значения среднеквадратических ошибок для явного потока тепла обе модели также показали в районе корабля погоды «Майк», а для скрытого – модель OAFflux в районе корабля погоды «Браво», модель ERA-Interim в районе плато Роколл.



Табл. 3.4 Среднеквадратические ошибки реанализов OAFlux и ERA-Interim относительно данных ICOADS ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

Регион	Скрытый поток тепла		Явный поток тепла	
	OAFlux	ERA-Interim	OAFlux	ERA-Interim
Альфа	34,1	-	16,7	-
Браво	22,9	-	42,5	-
Майк	30,4	27,6	10,6	11,0
Плато Роколл	24,2	25,8	11,9	11,8

## Межгодовая изменчивость

Для оценки межсезонной изменчивости были выбраны 3 района данных с наиболее продолжительными рядами измерений. Так, на корабле погоды Майк измерения проводились почти непрерывно на протяжении 31 года, а на корабле погоды Браво в районе плато Роколл ряды наблюдений составляют почти 20 лет. Отдельно для скрытого и явного потоков тепла был проведён вейвлет-анализ по данным ICOADS и OA-Flux, также между базами данных был проведён кросс-вейвлет-анализ.

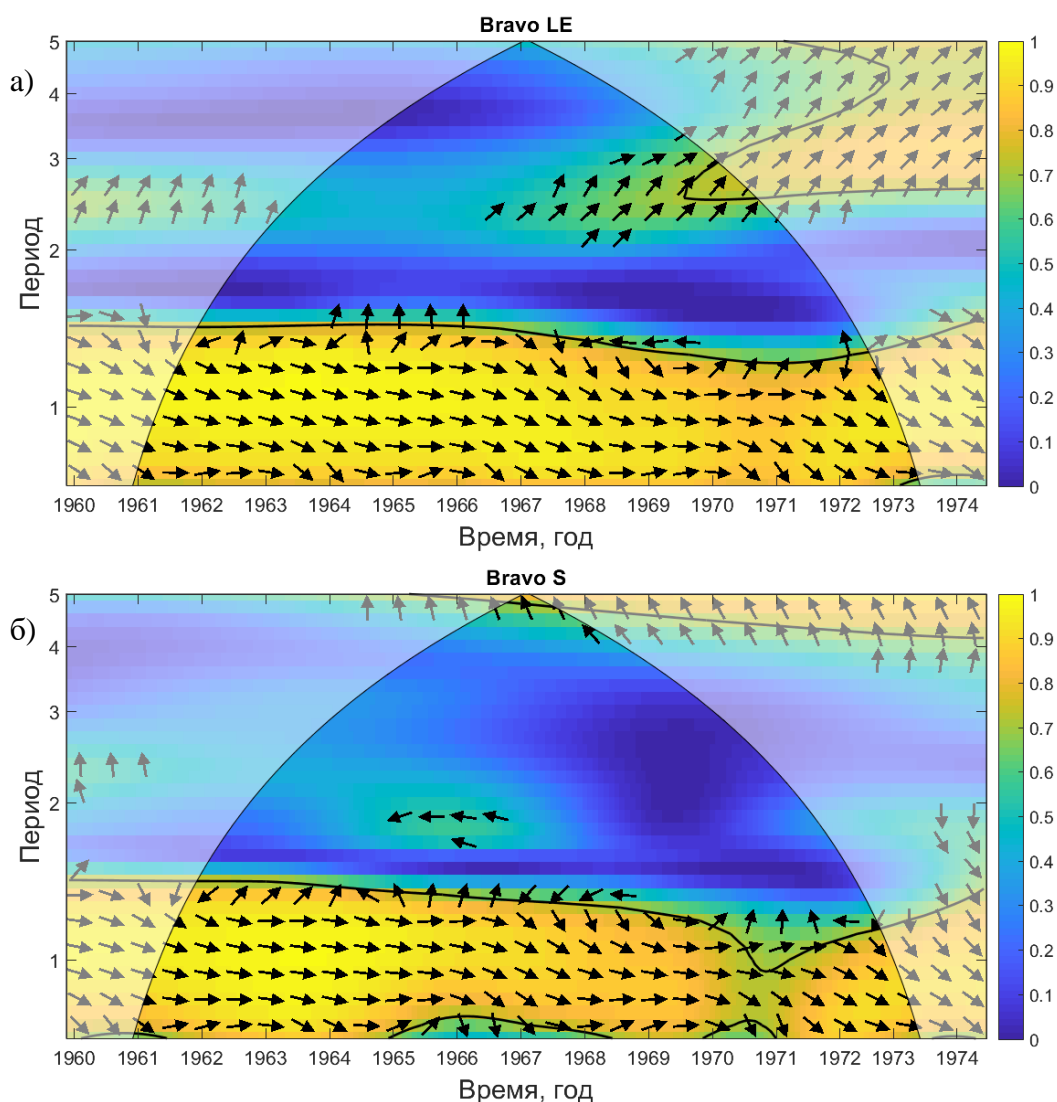


Рис. 3.11 Графики кросс-вейвлет-анализа по среднемесячным значениям по наблюдениям на корабле погоды Браво (Bravo) для данных ICOADS и OAFlux: а) скрытый поток тепла (LE), б) явный поток тепла. Цветом показана когерентность, стрелочками – синхронность фаз. Периоды указаны в годах.

По вейвлет-анализу для скрытых потоков тепла по данным ICOADS по данным корабля погоды Браво (см. приложение 2) в период 1962-1966 гг. выделяется цикличность 3-4 года, в период 1966-1972 гг. наблюдается цикличность в 2-3 года. Так же по вейвлет-

анализу прослеживается цикличность в 4 и 5 лет в период 1965-1970 гг. Однако по графикам кросс-вейвлет-анализа между данными ICOADS и OAFflux (рис. 3.11 а) можно определить, что OAFflux не повторяет ход этих цикличностей, а определяет только сезонный ход.

Аналогичная картина нам представляется и для явных потоков тепла по данным корабля погоды Браво (см. приложение 3 и рис. 3.11 б). По вейвлет-анализу для явных потоков тепла по данным ICOADS в период 1962-1972 гг. выделяется цикличность 3-4 года, в период 1966-1972 гг. наблюдается цикличность в 2 года. Так же по вейвлет-анализу прослеживается цикличность в 5 лет в период 1965-1970 гг. Но и для явных потоков OAFflux повторяет только ход сезонной изменчивости.

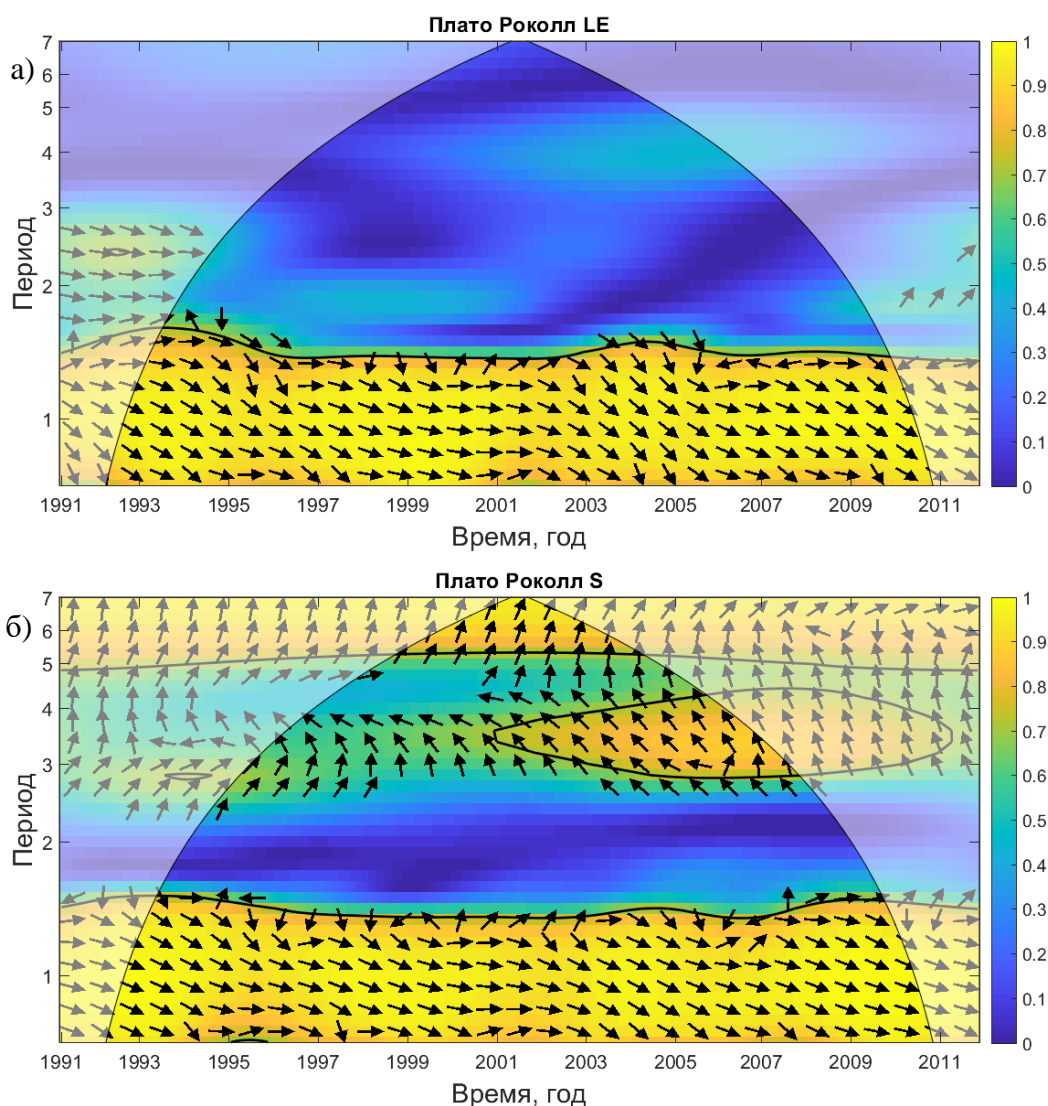


Рис. 3.12 Графики кросс-вейвлет-анализа по среднемесячным значениям по наблюдениям в районе плато Роколл для данных ICOADS и OAFflux: а) скрытый поток тепла (LE), б) явный поток тепла. Цветом показана когерентность, стрелочками – синхронность фаз. Периоды указаны в годах.

По вейвлет-анализу для скрытых потоков тепла по данным ICOADS по данным района плато Роколл (см. приложение 4) прослеживаются периоды 2-4 года с 1992 по 2001 гг., которые переходят в 2-3 года до 2006 г. Для явных потоков тепла вейвлет-анализ выделяет цикличности 2-3.5 года с 1992 г. по 1997 г., которые далее переходят в 2.5-3.5 года до 2002 г. Так же выделяются в 2005-2007 гг. - 2-3 года, в 2002-2007 - 3.5-5 лет и 6-7.5 за весь период. Но по графикам кросс-вейвлет-анализа (рис. 3.12) OAFflux повторяет только сезонный ход. Для явных потоков тепла для цикличности 3 года OAFflux определяет периоды, но опозданием в среднем в четверть периода.

Наилучшим образом OAFflux оценивает цикличности в наблюдениях на корабле погоды Майк, как для скрытых, так и для явных потоков тепла. По вейвлет-анализу для скрытых потоков тепла по данным ICOADS можно обозначить несколько цикличностей (рис. 3.13-а). С 1980 по 1990 г выделяется цикличность в 3-4 года, которая дальше переходит в 2-3 года и продолжается до 2006 г. Так же видно цикличность в 3-5 лет с 1999 по 2007 г и цикличность в 8.5-11 лет с 1987 по 1997 г. Слабовыраженная в 6-7 лет проявляется в период 1981-1996 гг. На рисунке 3.13-в видно, OAFflux хорошо повторяет цикличности с периодом до 6 лет. Когерентность для цикличностей с периодом больше 6 лет равна 0. Эти цикличности проявляются в массиве ICOADS, но не в реанализе.

Для явных потоков тепла по данным ICOADS по вейвлет-анализу в период 1994-2005 гг. выделяется цикличность 2-3 года, в период 1998-2004 гг. наблюдается цикличность в 3-4 года, далее обе сливаются в 2-4 года до 2009 г (рис. 3.14-б). Так же по вейвлет-анализу прослеживается цикличность в 8.5-9 лет в период 1996-2005 гг. По графику кросс-вейвлет анализа (рис. 3.14-в) можно определить, что OAFflux, как и для скрытых потоков тепла, хорошо повторяет цикличности с периодом до 6 лет, для больших периодов когерентность меньше 0,5.

Данные ICOADS позволяют проследить изменчивость потоков тепла на границе океан-атмосфера только в отдельных точках и на ограниченных промежутках времени. Особенно мало измерений в интересующих нас приполярных районах. Вместе с тем предыдущий анализ показал, что OAFflux достаточно хорошо позволяет выявить основные цикличности потоков тепла только по сравнению с данными наблюдений с корабля погоды Майк, который расположен в Норвежском море, но не в море Лабрадор. Поэтому дальнейший анализ сезонной, и межгодовой изменчивости потоков тепла проводились только для Северо-Европейского бассейна СЛО, который составляет основы следующего этапа работы (глава IV).

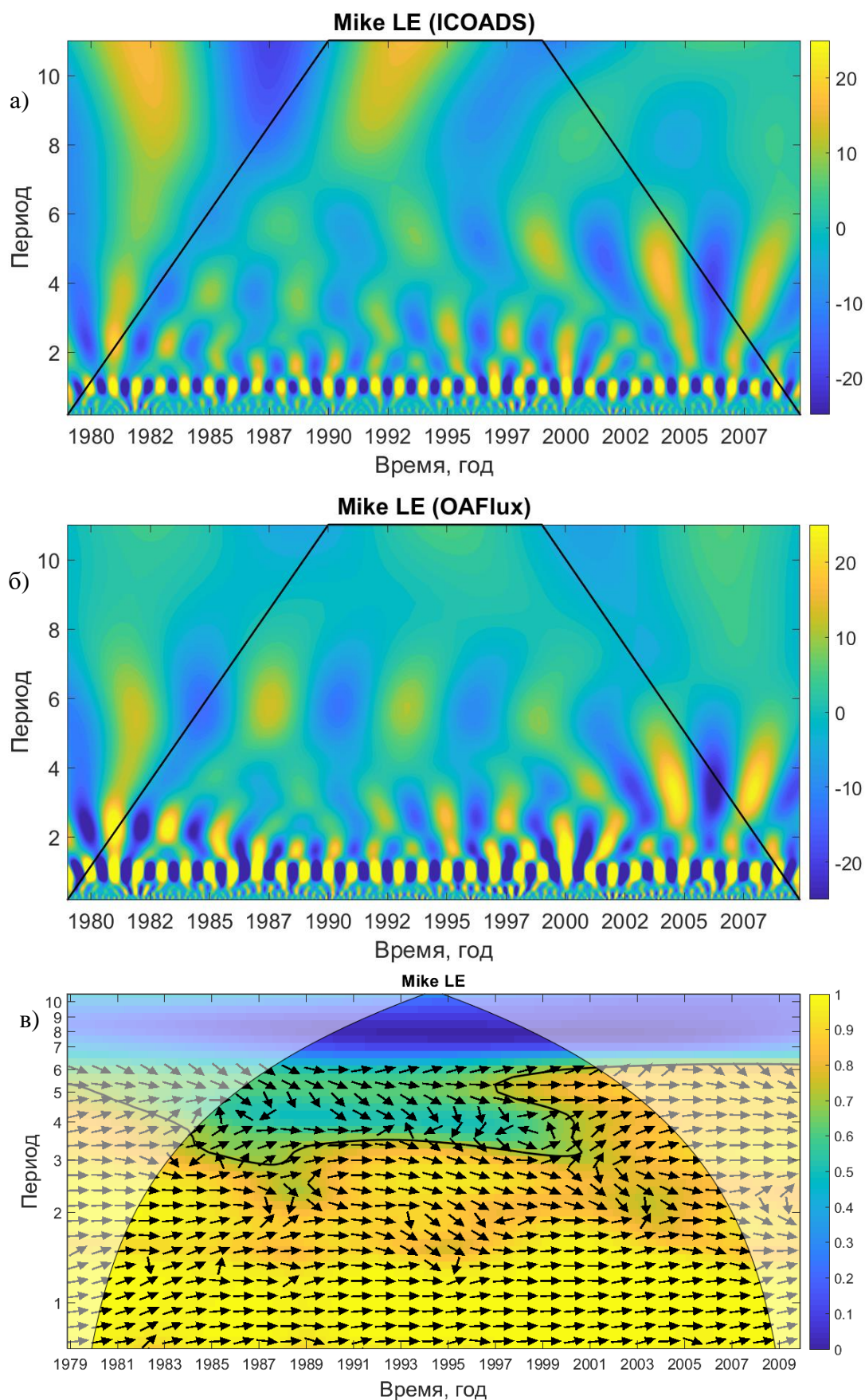


Рис. 3.13 а-б) Графики вейвлет-анализа по среднемесячным значениям скрытого потока тепла ( $\text{Вт/м}^2$ ) (LE) по наблюдениям на корабле погоды Майк (Mike): а) по данным ICOADS, б) по данным OAFflux. в) График кросс-вейвлет-анализа. Периоды указаны в годах.



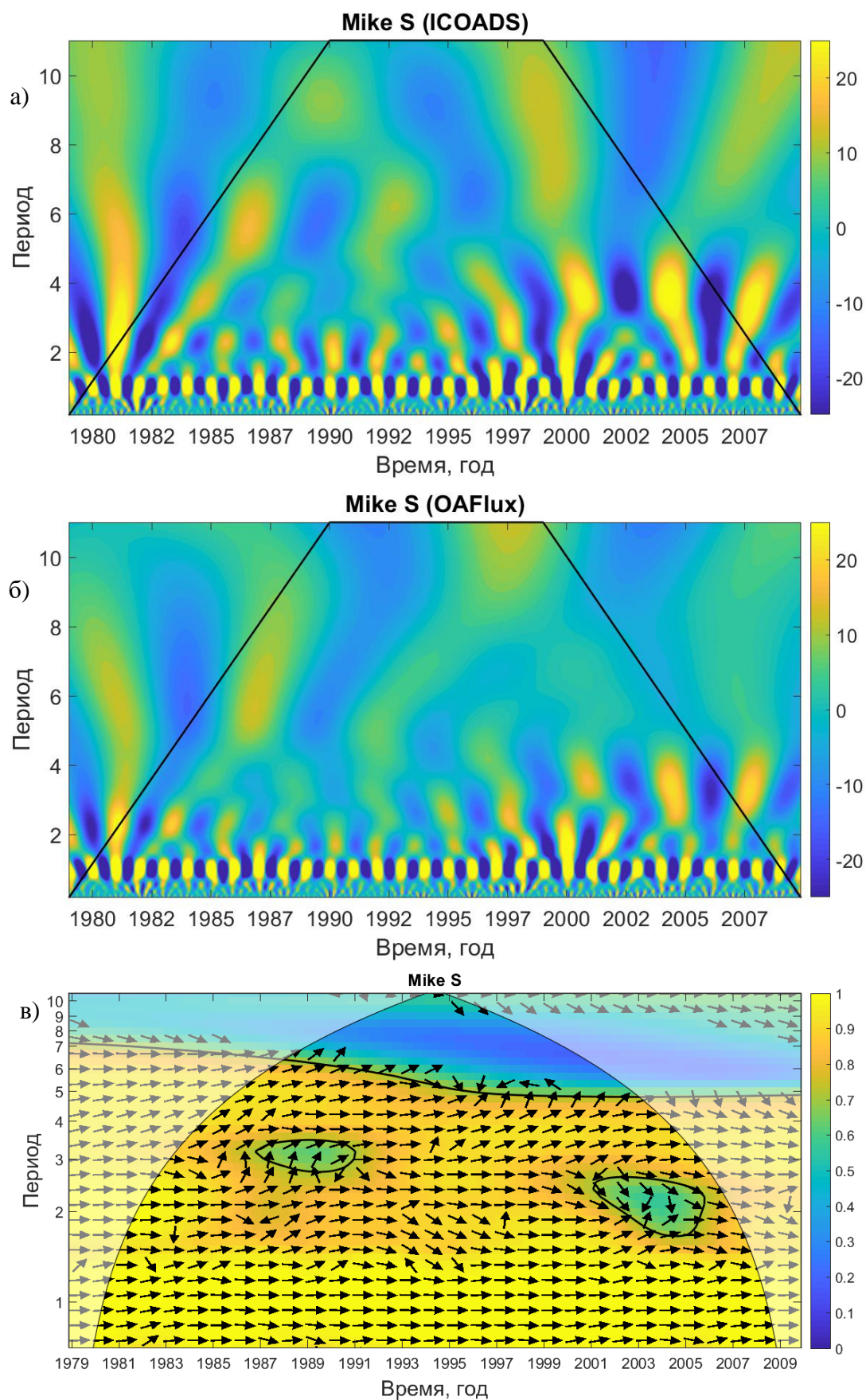


Рис. 3.14 а-б) Графики вейвлет-анализа по среднемесячным значениям явного потока тепла ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) ( $S$ ) по наблюдениям на корабле погоды Майк (Mike): а) по данным ICOADS, б) по данным OAFflux. в) График кросс-вейвлет-анализа. Периоды указаны в годах.

## Глава IV. Межгодовая изменчивость океанических и атмосферных потоков тепла в акваториях Северо-Европейского бассейна СЛО

Карта районов исследования баланса потоков тепла приводится на рисунке 4.1. Было выделено 2 района исследования. 1 район ограничивается на юге разрезом №1 (вдоль 65° с.ш. от 0° до 10° в.д.), на севере разрезом №2 (вдоль 74° с.ш. от 3° до 19° в.д.), на востоке Скандинавским полуостровом и разрезом №4 (вдоль 19° в.д. от 70 до 74° с.ш.), западная граница определена по западной границе Норвежского течения. Район 2 ограничивается на юге разрезом №2, на севере разрезом №3 (вдоль 78° с.ш. от 3° до 13° в.д.), на востоке разрезом №6 (вдоль 17,5° в.д. от 74 до 76° с.ш.) и архипелагом Шпицберген, на западе разрезом №5 (вдоль 3° в.д. от 74 до 78° с.ш.).

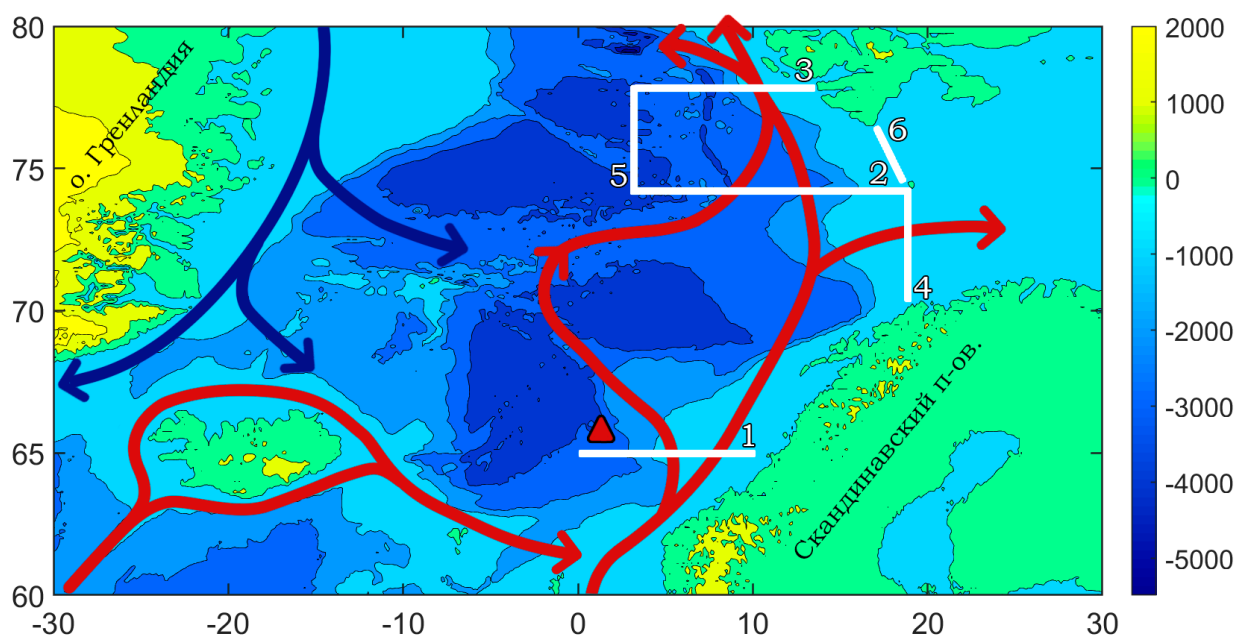


Рис. 4.1 Карта-схема высот и глубин Северо-Европейского бассейна СЛО. Цветовая шкала указывает высоты и глубины, синие и красные стрелки – холодные и тёплые течения, соответственно, белые прямые – разрезы с номерами. Красным треугольником показан корабль погоды Майк.

Графики сезонного хода потоков тепла, учитываемых в балансе теплосодержания (горизонтальные океанические потоки через разрезы, суммарные скрытые и явные потоки тепла, а также радиационный баланс), для районов исследования 1 и 2 представлены в приложениях 6 и 7 соответственно. В этой главе представлено описание межгодовой изменчивости потоков тепла, их баланса и теплосодержания районов исследования.

## Межгодовая изменчивость

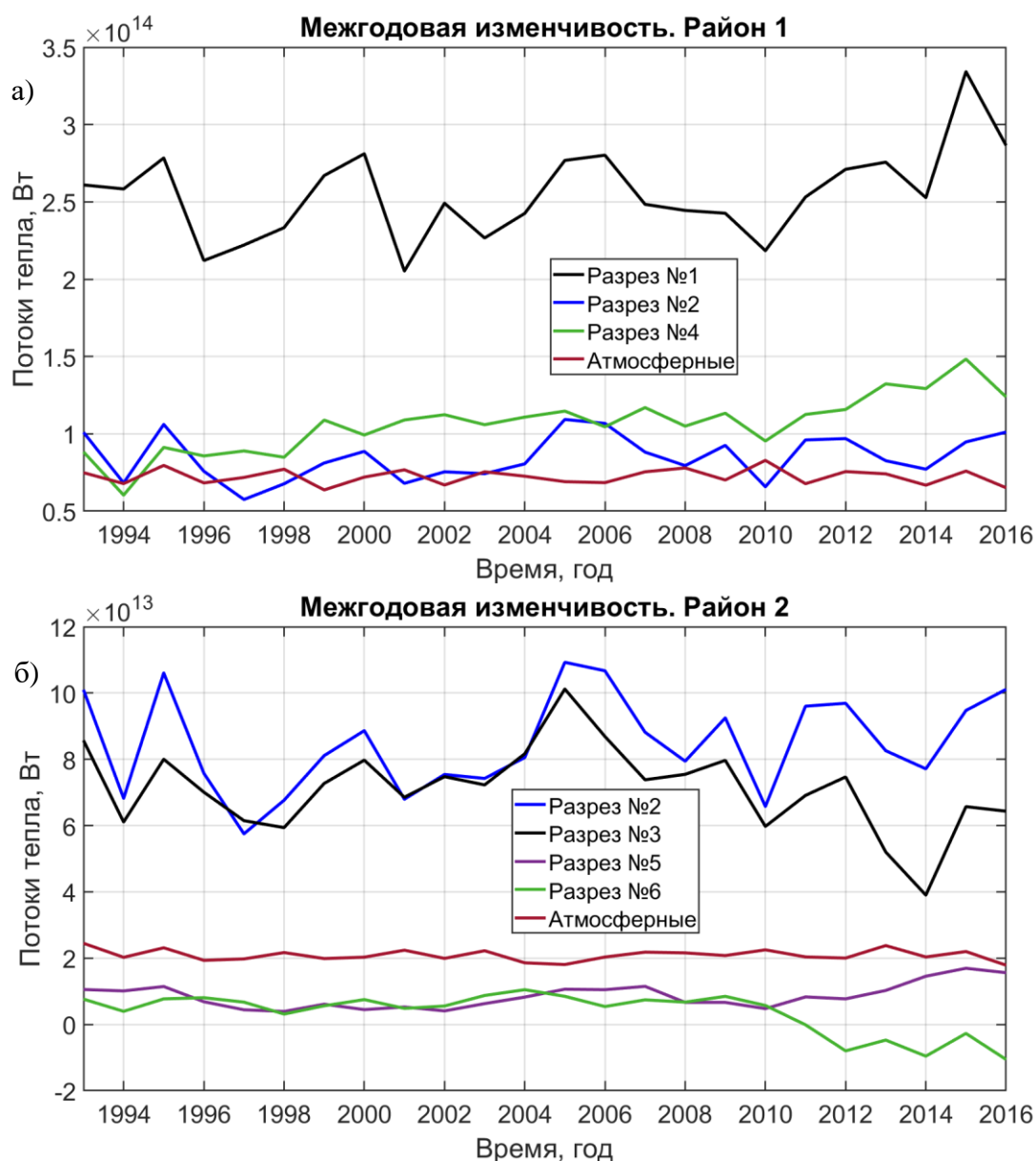


Рис. 4.2 Графики среднегодового временного хода потоков тепла (Вт), учитываемых в балансе (для удобства сравнения все потоки на графиках приведены со знаком плюс): а) район 1: потоки тепла внутрь области - разрез 1, из области – разрез 2 и 4, атмосферные потоки тепла в направлены из океана в атмосферу, б) 2 район: потоки тепла внутрь области - разрез 2 и 6, из области – разрез 3 и 5, атмосферные потоки тепла в направлены из океана в атмосферу.

Графики среднегодового временного хода радиационного баланса для районов исследования 1 и 2 представлены в приложении 8, так как их значения значительно ниже остальных потоков (см. табл. 4.1 и 4.2 соответственно).

Из среднегодовых значений океанических и атмосферных потоков тепла для района 1 (см. рис. 4.2-а) видно, что приходящий поток тепла через разрез №1 примерно в 2,5 раза



больше других океанических потоков тепла. При этом, по оценкам средних значений (табл. 4.1) сумма потоков через разрезы №2 и №4 и атмосферных потоков примерно равна количеству тепла, проходящего через разрез №1. Суммарный баланс всех потоков тепла рассчитывается по формуле:  $Q = Q_R + [Q_{op} - Q_{om}] - Q_a$  (где  $Q$  – общий баланс потоков тепла,  $Q_R$  – радиационный баланс,  $Q_{op} - Q_{om}$  – разность горизонтальных океанических потоков тепла внутрь и из района исследования,  $Q_a$  – вертикальные потоки тепла из океана в атмосферу). Т.о. дивергенция адвективных океанических потоков тепла в область исследования плюс положительный поток тепла, как результат радиационного баланса, примерно компенсируется теплообменом с атмосферой. Дисбаланс потоков находится в пределах ошибки средних. Некоторый дисбаланс все же присутствует, т.к. в этой работе учитываются не все составляющие теплового баланса. Например, не учтен теплообмен с нижележащими слоями и горизонтальные турбулентные потоки тепла. Это подтверждается результатами сравнения аккумулязированной дивергенции рассчитанных потоков тепла и тенденции изменчивости теплосодержания (рис. 4.3-а): на графике видно, что изменчивость аккумулязированной дивергенции потоков тепла существенно выше изменчивости теплосодержания.

Табл. 4.1 Средние значения потоков тепла для региона 1 (прим.: ошибка среднего рассчитывалась при уровне значимости 0,95)

	Среднее $\pm$ ошибка среднего (Вт)
Разрез №1	$2,6 \pm 0,1 * 10^{14}$
Разрез №2	$8,5 \pm 0,6 * 10^{13}$
Разрез №4	$1,1 \pm 0,08 * 10^{14}$
Атмосферные	$7,2 \pm 0,2 * 10^{13}$
Радиационный баланс	$1,2 \pm 0,06 * 10^{13}$
Баланс потоков	$3,1 \pm 9,3 * 10^{12}$

До 2010 года, для 2 района исследования среднегодовые значения потоков океанического тепла (см. рис. 4.2-б), приходящих в район через разрез №2, примерно компенсируются, уходящими потоками через разрез №3; аналогично – для разрезов №6 и №5. После 2010 года разница между потоками увеличивается, а средние потоки через разрез №6 меняют своё направление на противоположное. При этом дивергенция адвективных океанических потоков компенсируется потоками тепла в атмосферу, а радиационный баланс примерно на порядок ниже остальных потоков и не играет большой роли в балансе (табл. 4.2). Однако, в отличие от района 1, существующие расхождения (особенно после 2010 года) в сумме дают отрицательный баланс потоков, который по порядку величины

сравним с самими потоками. Также, в отличии от района 1 исследования, в районе 2 аккумулированный баланс имеет отрицательный тренд, противоположный по знаку тренду в теплосодержании. Это также свидетельствует, что в работе учтены не все составляющие теплового баланса. Предполагается, что в этом районе особое значение будут играть горизонтальный турбулентный теплообмен в океане, т. е. потоки тепла с вихрями, приходящими из района 1.

*Табл. 4.2 Средние значения потоков тепла для региона 2 (прим.: ошибка среднего рассчитывалась при уровне значимости 0,95)*

	Среднее $\pm$ ошибка среднего (Вт)
Разрез №2	$9,1 \pm 0,6 * 10^{13}$
Разрез №3	$7,1 \pm 0,5 * 10^{13}$
Разрез №5	$8,6 \pm 1,5 * 10^{12}$
Разрез №6	$3,6 \pm 2,5 * 10^{12}$
Атмосферные	$2,1 \pm 0,07 * 10^{13}$
Радиационный баланс	$9,7 \pm 1,4 * 10^{11}$
Баланс потоков	$-1,1 \pm 0,2 * 10^{13}$

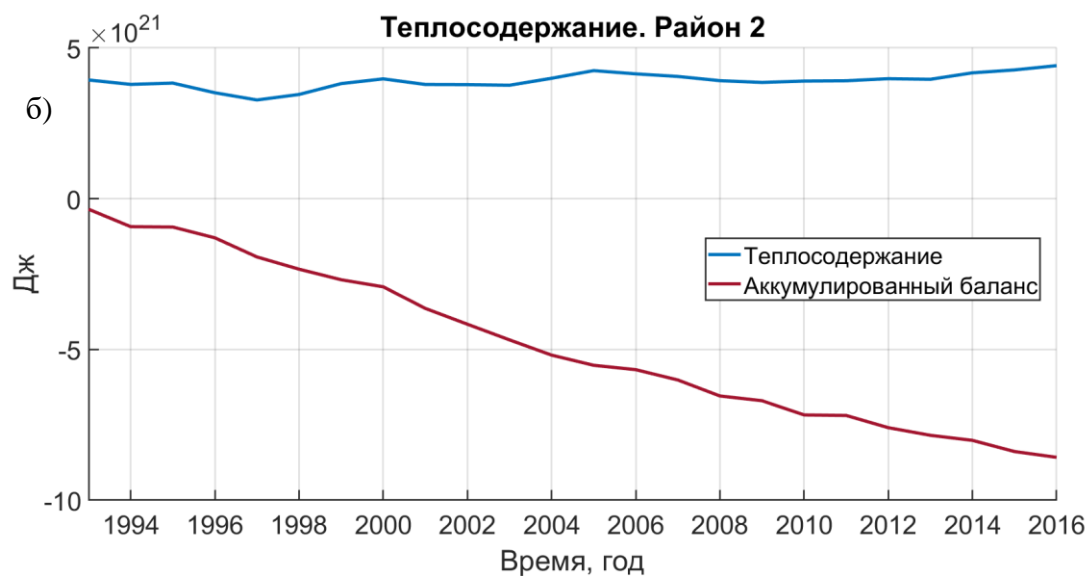


Рис. 4.3 Графики среднегодового временного хода теплосодержания (Дж): а) для 1 района исследования, б) для 2 района исследования.

## Выводы

В данной работе была проанализирована сезонная изменчивость потоков тепла на границе океан-атмосфера в северной Атлантике по данным реанализов (OAFlux и ERA-Interim) в сравнении с натурными измерениями (база данных ICOADS). Сравнение величин потоков явного и скрытого тепла показало, что обе модели реанализа, в целом, правильно отражают сезонный ход во всех областях района исследований. Все модели показывают увеличение потоков из океана в атмосферу в зимний период года, как явного, так и скрытого. Это связано с уменьшением поступления солнечной энергии в Северном полушарии в зимний сезон, и более быстрым выхолаживанием атмосферы, чем океаном, обладающим большей теплоёмкостью. Это ведет к увеличению разности температур океан-атмосфера, которое, вкупе с уменьшением влажности воздуха и увеличением скорости ветра, приводит к росту теплообмена океана и атмосферы.

Обе модели реанализа OAFlux и ERA-Interim практически идентично описывают сезонный ход во всех исследуемых районах. При этом, оба реанализа существенно завышают значения скрытых потоков тепла в зимний период и несколько занижают значения явных потоков тепла (особенно в летний период). В исследуемых районах OAFlux несколько лучше, чем ERA-Interim воспроизводит характер и амплитуду сезонного хода как потока явного, так и скрытого тепла, выявленную по данными наблюдений. OAFlux в дальнейшем использовался как основной массив для оценки потоков тепла на границе океан-атмосфера.

При анализе межгодовой изменчивости было выявлено, что межгодовая изменчивость явных потоков тепла несколько выше, чем скрытых потоков тепла. В натурных и модельных данных, в скрытых и явных потоках тепла были выделены цикличности 2-3 года, 4-5-лет и более 8 лет. При этом, модель реанализа OAFlux неплохо воспроизводила выявленные на основе натурных наблюдений цикличности в Норвежском море, но не в море Лабрадор. Дальнейший анализ межгодовой изменчивости потоков тепла проводились только для Северо-Европейского бассейна СЛО.

В двух областях Северо-Европейского бассейна СЛО (рис. 4.1) был проведен анализ сравнительной роли интегрального по области теплообмена океана и атмосферы, поступления тепла с радиационным балансом, а также адвекции тепла течениями в верхнем 500-м слое океана. Глубина слоя соответствует средней мощности слоя теплых атлантических вод в регионе.

Результаты показали, что в области 1 (Лофотенский бассейн Норвежского моря) и в области 2 (к юго-западу от о. Шпицберген) теплообмен с атмосферой представляет собой

существенную часть теплового баланса (примерно треть от приходящего океанического тепла), но его межгодовая изменчивость вносит небольшой вклад в межгодовую изменчивость последнего.

Аккумулированная дивергенция потоков тепла в области 1 менялась значительно сильнее, чем теплосодержание. В районе 2 наблюдались отрицательные тенденции аккумулированной дивергенции потоков тепла при положительных тенденциях теплосодержания. Это говорит о том, что были учтены не все существенные факторы баланса тепла в каждом из регионов. В частности, необходимо учесть не только адвективный, но и турбулентный теплообмен между районом 1 и 2, через хребты, ограничивающие бассейны, а также вертикальную диффузию тепла вглубь океана.

## Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Башмачникову Игорю Львовичу не только за научные консультации, но и за терпение и бесконечный запас новых идей, за готовность всегда подсказать, помочь и направить на путь истинный. Особую благодарность хочется выразить Юровой Алле Юрьевне за дополнительные консультации и способность дать простое объяснение на любой вопрос.

Хотелось бы выразить благодарность преподавателям кафедры «Океанология»: Иванову Борису Вячеславовичу за проведение курса «Термодинамика океана», Колдунову Алексею Владимировичу и Маю Руслану Игоревичу за курсы программирования в «Matlab».

Также хотелось бы поблагодарить студентов СПбГУ направления «Гидрометеорология» профиля «Океанология» Яковлеву Диану Андреевну (4 курс) и Калавиччи Катрину Альбертовну (3 курс) за помощь и советы в визуализировании данных и выпускника СПбГУ факультета «Искусств» направления «Прикладная информатика в области искусств и гуманитарных наук» Деркача Никиту Михайловича (выпуск 2015 г.) за помощь в графической обработке карт.

## Список литературы

1. Björk, G., Gustafsson, B. G., Stigebrandt, A., 'Upper Layer Circulation of the Nordic Seas as Inferred from the Spatial Distribution of Heat and Freshwater Content and Potential Energy', *Polar Research* 20(2), 2001, 161–168
2. Blindheim, J., 'Arctic Intermediate Water in the Norwegian Sea', *Deep-Sea Research* 37 (9), 1990, 1475–1489
3. Buongiorno Nardelli, B., S. Guinehut, A. Pascual, Y. Drillet, S. Ruiz, and S. Mulet, 'Towards High Resolution Mapping of 3-D Mesoscale Dynamics from Observations', *Ocean Science*, 8 (2012), 885–901 <<https://doi.org/10.5194/os-8-885-2012>>
4. Hansen, B., Østerhus, S., 'North Atlantic–Nordic Seas Exchanges', *Progress in Oceanography* 45 (2), 2000, 109–208
5. Helland-Hansen, B., Nansen, F., 'The Norwegian Sea: Its Physical Oceanography', *Rep. Norw. Fish. Mar. Inv., Vol. II. The Royal Department of Trade, Navigation and Industries, Oslo, Norway*, 1909
6. Hersbach, Hans, and Lee Dick, 'ERA5 Reanalysis Is in Production', *ECMWF Newsletter*, 147 (2016), 7 <<http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16299-newsletter-no147-spring-2016.pdf>>
7. Huang, Peisheng, Thomas B. Sanford, and Jörg Imberger, 'Heat and Turbulent Kinetic Energy Budgets for Surface Layer Cooling Induced by the Passage of Hurricane Frances (2004)', *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114 (2009), 1–14 <<https://doi.org/10.1029/2009JC005603>>
8. Larnicol, G., S. Guinehut, M.-H. Rio, M. Drevillon, Y. Faugere, and G. Nicolas, 'The Global Observed Ocean Production of the French Mercator Project', *Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry*, 2006, 8–10
9. Mosby, H., 'Deep Water in the Norwegian Sea', *Geophysica Norvegica*, 21(3), 1959, 62
10. Mosby, H., 'Water, Salt, and Heat Balance of the North Polar Sea and of the Norwegian Sea', *Geophysica Norvegica* 24 (11), 1970, 289–313
11. Nilsen, J. Even Ø., and Eva Falck, 'Variations of Mixed Layer Properties in the Norwegian Sea for the Period 1948-1999', *Progress in Oceanography*, 70 (2006), 58–90 <<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.014>>
12. Orvik, K.A., Niiler, P., 'Major Pathways of Atlantic Water in the Northern North Atlantic and Nordic Seas towards Arctic', *Geophysical Research Letters* 29 (19), 2002 <<https://doi.org/10.1029/2002GL01500>>

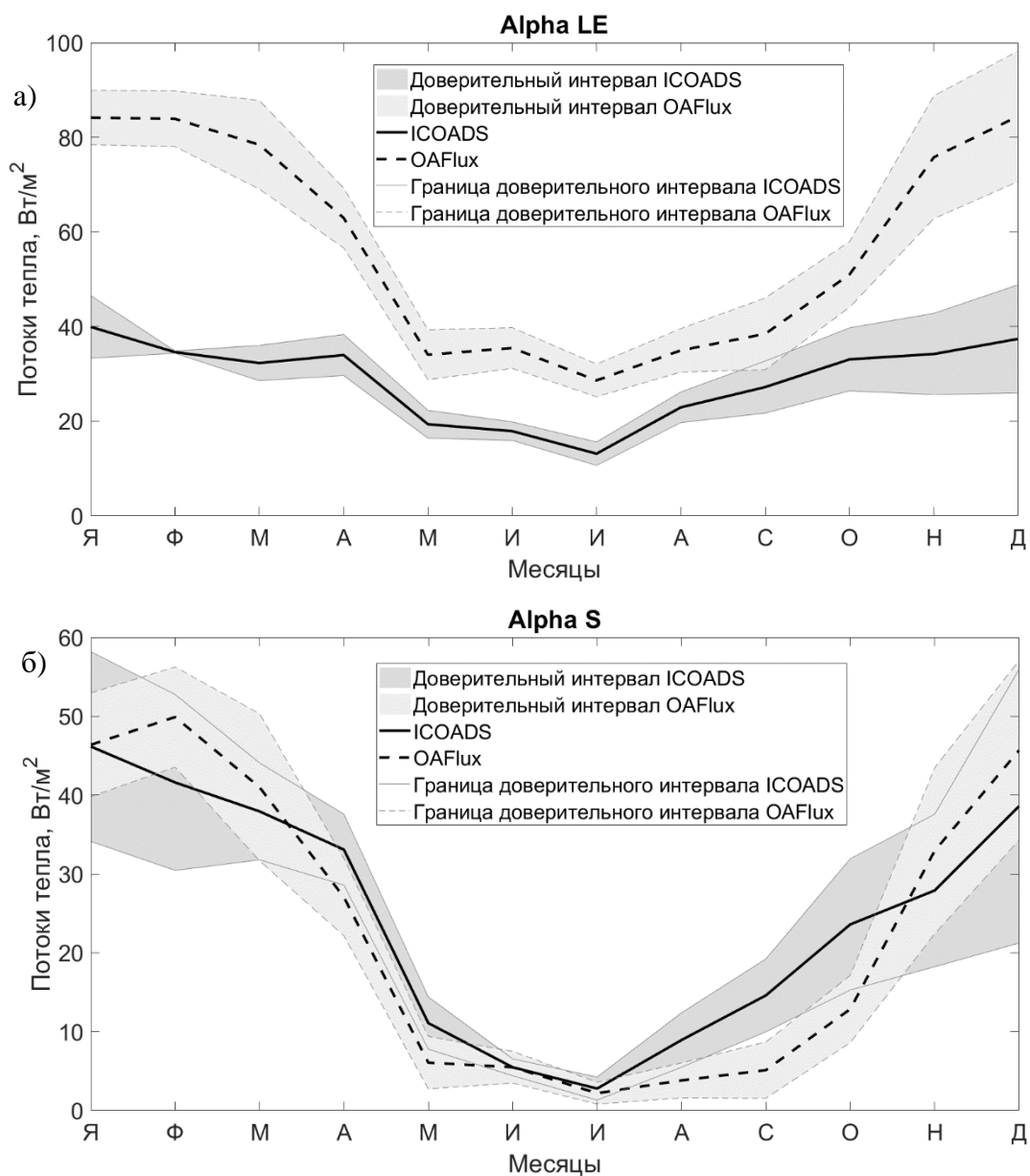
13. Orvik, K.A., Skagseth, Ø., Mork, M., 'Atlantic Inflow to the Nordic Seas. Current Structure and Volume Fluxes from Moored Current Meters, VM-ADCP and SeaSoar-CTD Observations, 1995–1999', *Deep-Sea Research I* 48 (4), 2001, 937–957
14. Sælen, O.H., 'Studies in the Norwegian Atlantic Current. Part II: Investigations during the Years 1954–59 in an Area West of Stad', *Geophysica Norvegica* 23 (6), 1963, 82
15. Skagseth, Øystein, Tore Furevik, Randi Ingvaldsen, Harald Loeng, Kjell Arne Mork, Kjell Arild Orvik, and others, 'Volume and Heat Transports to the Arctic Ocean Via the Norwegian and Barents Seas', *Arctic–Subarctic Ocean Fluxes*, 2008, 45–64
16. Smedsrud, L.H., I. Esau, R.B. Ingvaldsen, T. Eldevik, P.M. Haugan, C. Li, and others, 'The Role of the Barents Sea in the Arctic Climate System', *Reviews of Geophysics* 51(3), 2013, 415–49
17. Smith, S. D., 'Coefficients for Sea Surface Wind Stress, Heat Flux, and Wind Profiles as a Function of Wind Speed and Temperature', *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988 <[<https://doi.org/93\(C12\)>](https://doi.org/93(C12))>
18. Yu, L., X. Jin, and R. A. Weller, 'Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and Sensible Heat Fluxes, Ocean Evaporation, and Related Surface Meteorological Variables.', *Oa-2008-01*, 2008, 64



## Приложения

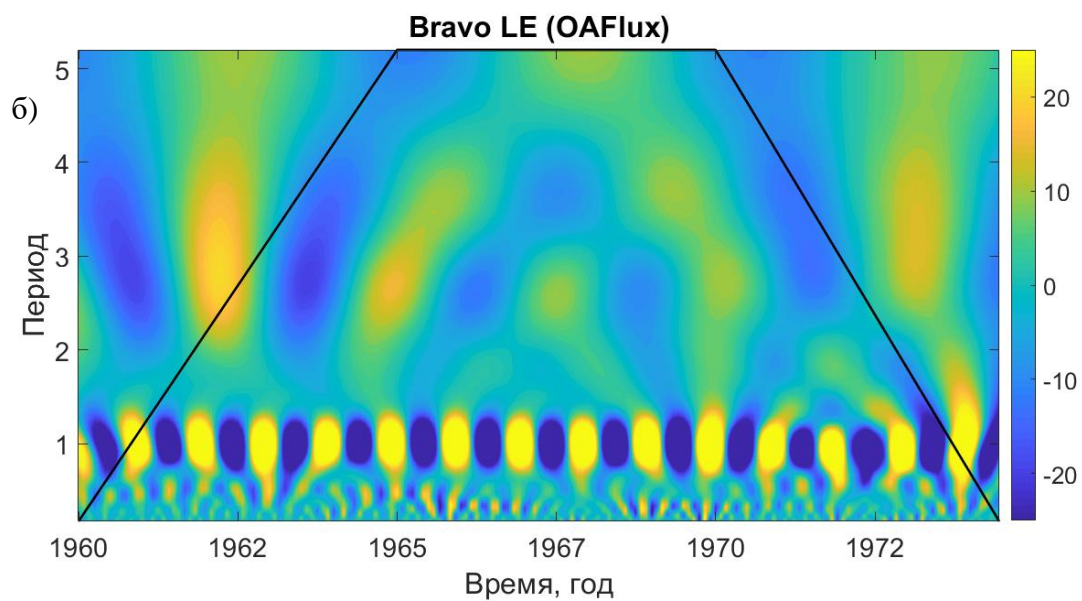
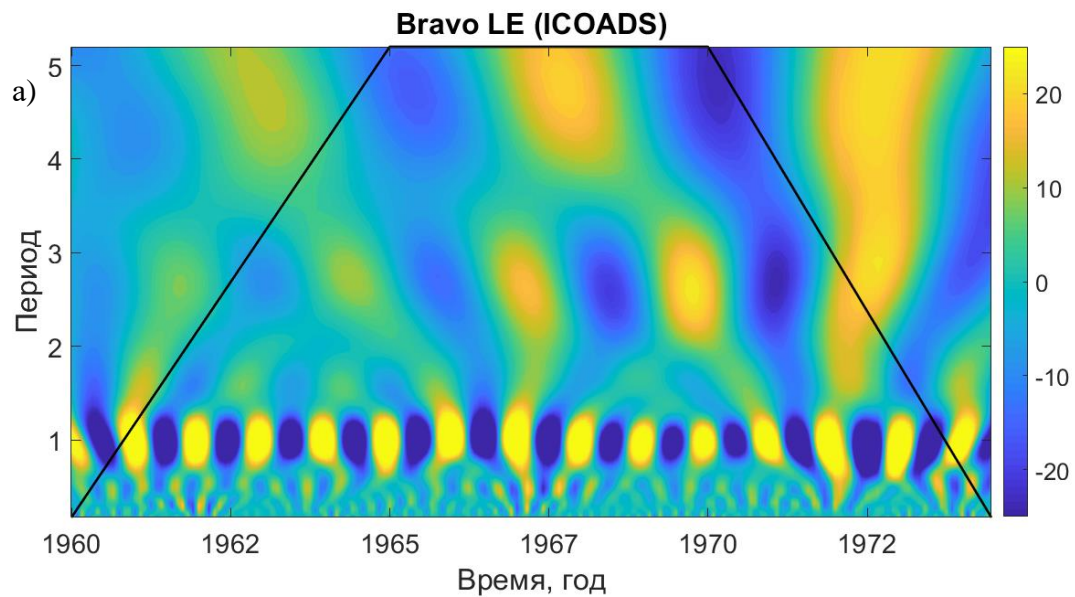
### Приложение 1

Графики среднегодового сезонного хода по наблюдениям на корабле погоды Альфа (Alpha): а) скрытый поток тепла (LE), б) явный поток тепла (S). Чёрная сплошная кривая – данные ICOADS, черная пунктирная кривая – данные OAFlux; серые области – доверительные интервалы: тёмная – ICOADS, светлая – OAFlux; серая сплошная кривая – граница доверительного интервала ICOADS, серая пунктирная кривая – граница доверительного интервала OAFlux. Имеются большие разрывы в данных, поэтому в некоторые месяцы осреднения могут проводиться за разные годы.



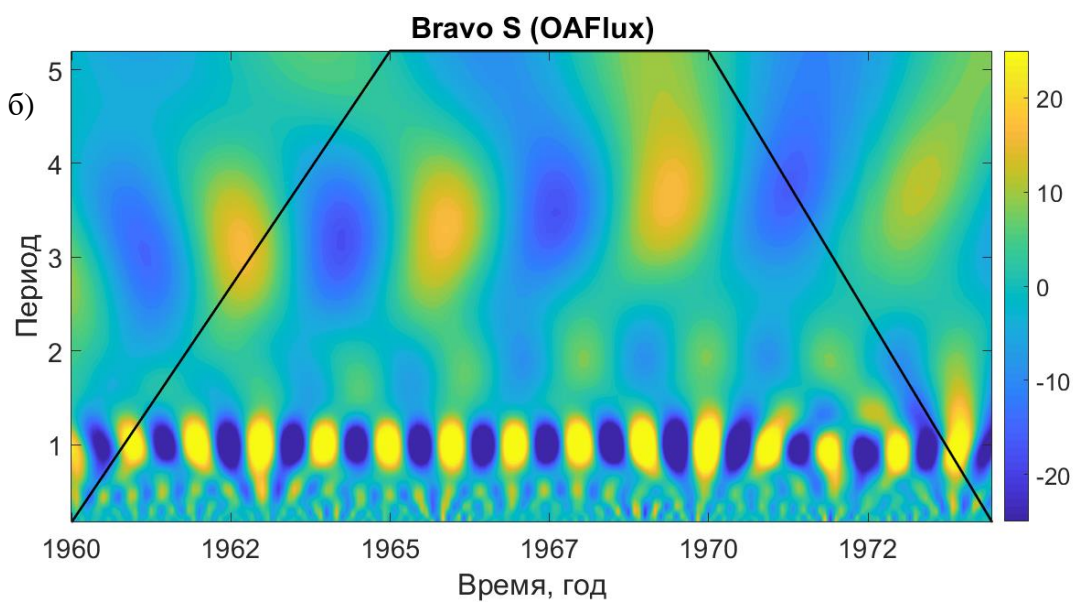
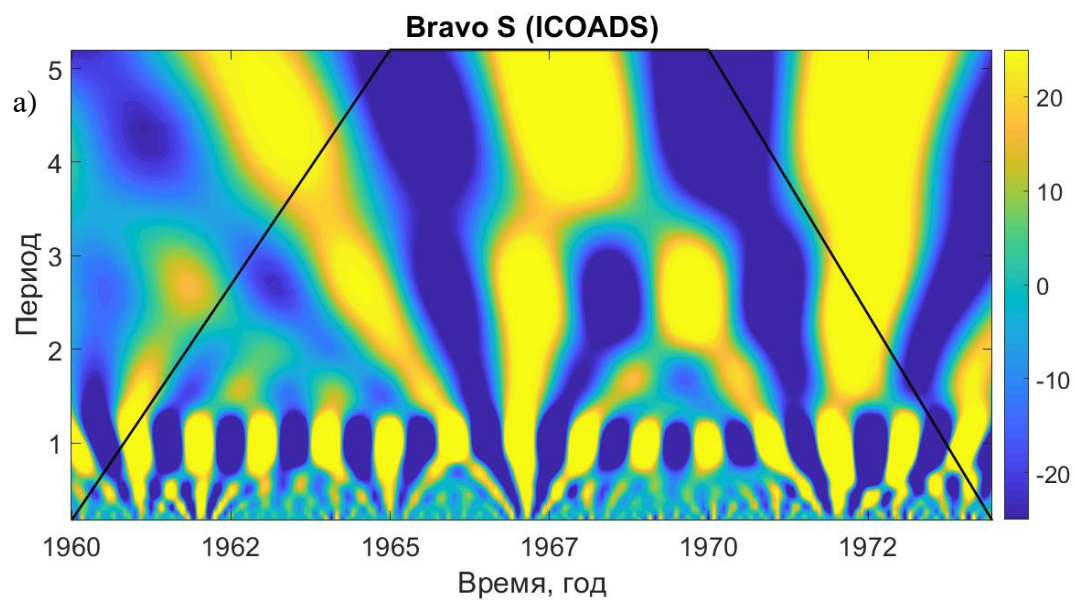
## Приложение 2

Графики вейвлет-анализа по среднемесячным значениям скрытого потока тепла ( $\text{Вт/м}^2$ ) (LE) по наблюдениям на корабле погоды Браво (Bravo): а) по данным ICOADS, б) по данным OAFlux. Периоды указаны в годах.



### Приложение 3

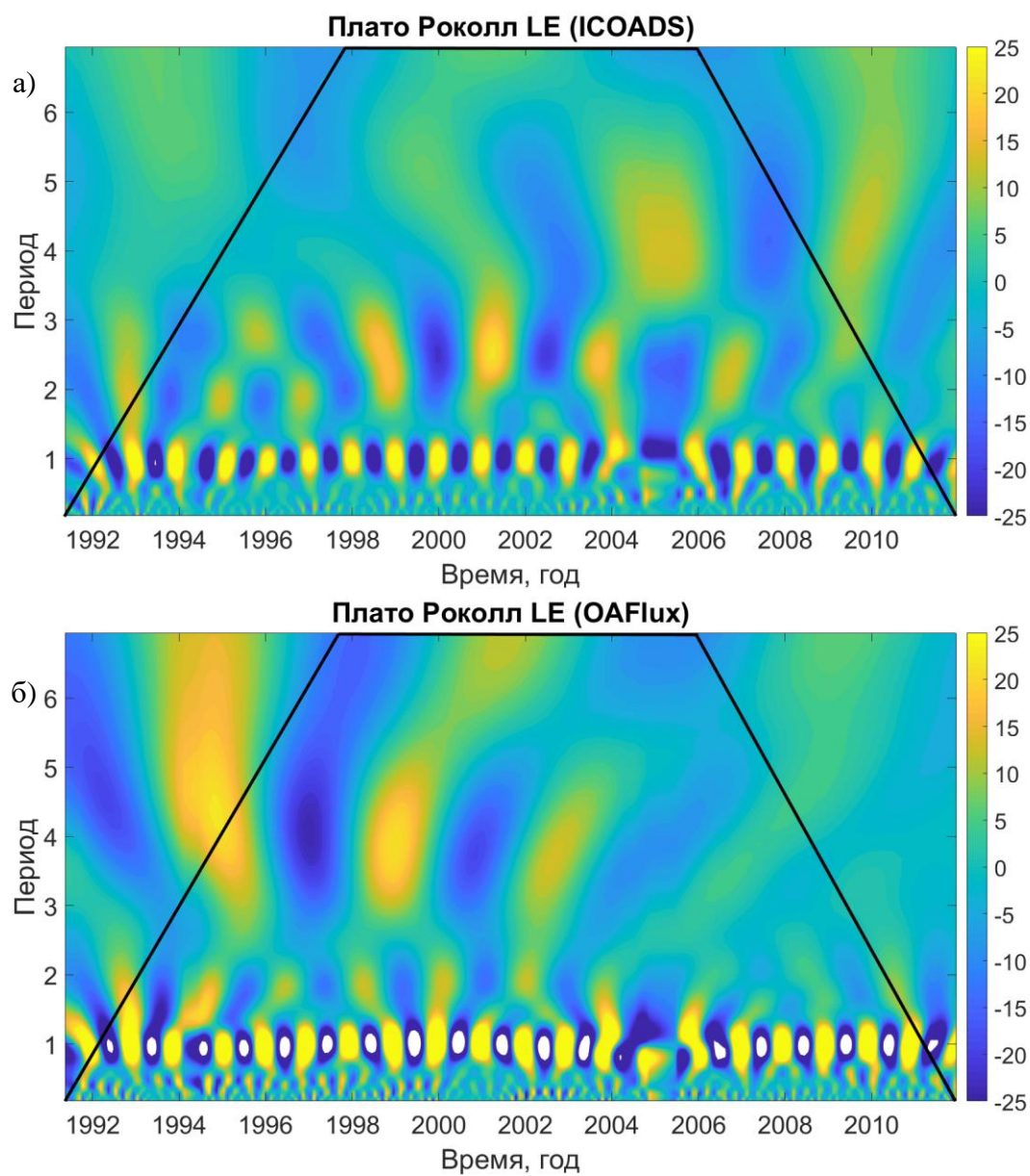
Графики вейвлет-анализа по среднемесячным значениям явного потока тепла ( $\text{Вт/м}^2$ ) (S) по наблюдениям на корабле погоды Браво (Bravo): а) по данным ICOADS, б) по данным OAFflux. Периоды указаны в годах.





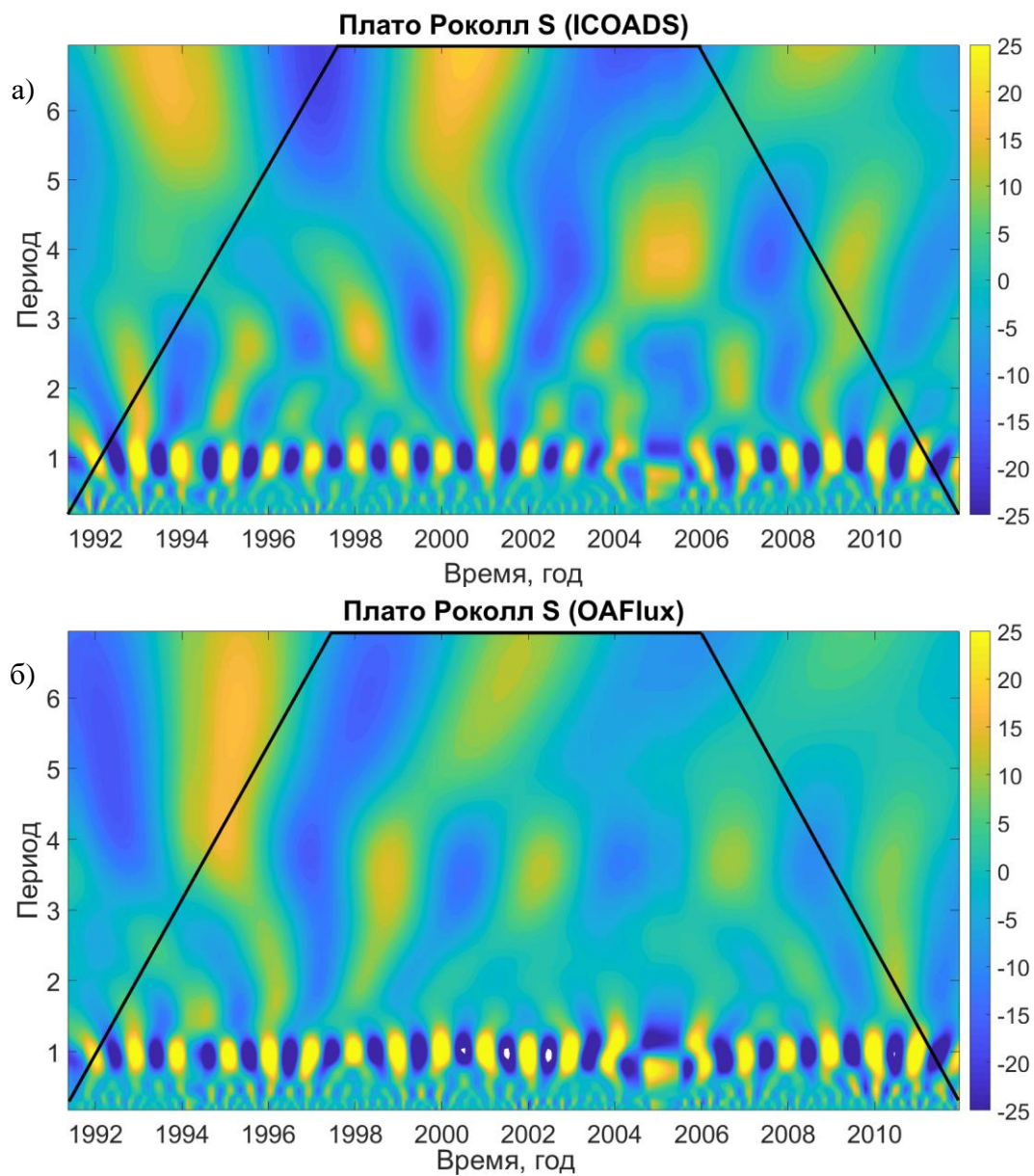
#### Приложение 4

Графики вейвлет-анализа по среднемесячным значениям скрытого потока тепла ( $\text{Вт/м}^2$ ) (LE) по наблюдениям в районе плато Роколл: а) по данным ICOADS, б) по данным OAFflux. Периоды указаны в годах.



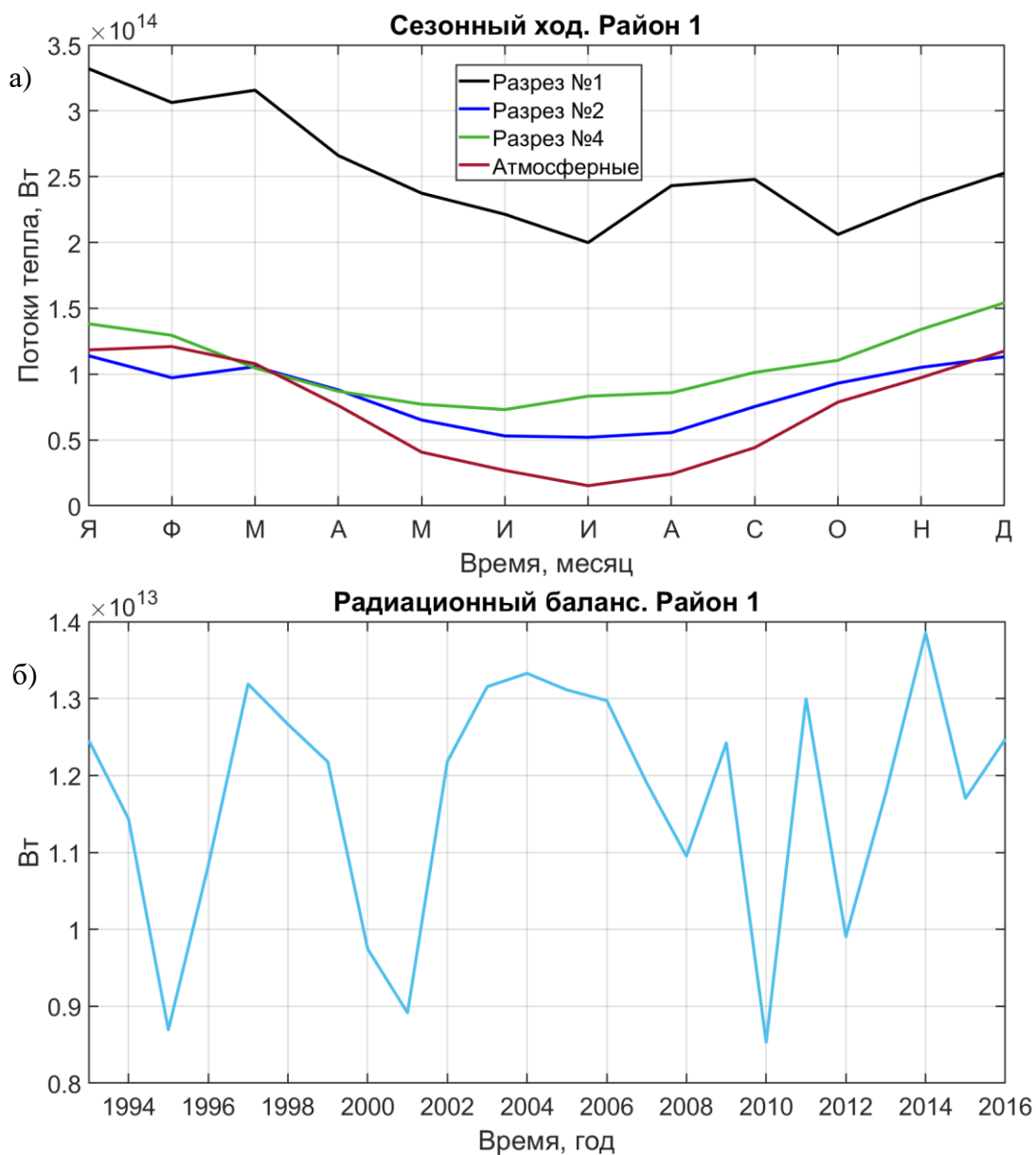
## Приложение 5

Графики вейвлет-анализа по среднемесячным значениям явного потока тепла ( $\text{Вт/м}^2$ ) (S) по наблюдениям в районе плато Роколл: а) по данным ICOADS, б) по данным OAFflux. Периоды указаны в годах.



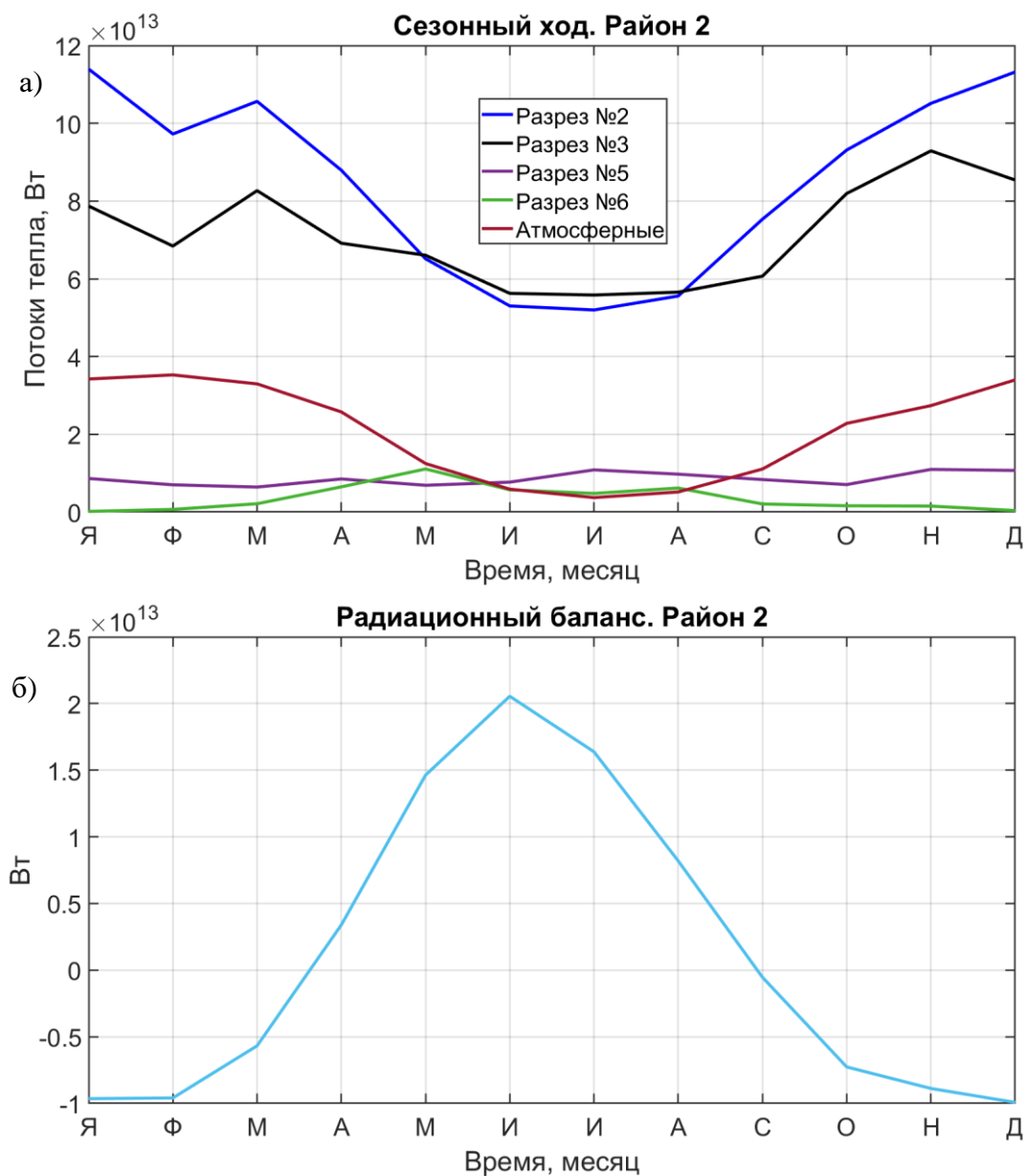
## Приложение 6

Графики среднемноголетнего сезонного хода интегральных потоков тепла (Вт) для района 1: а) океанических и атмосферных потоков тепла, б) радиационного баланса (положительные потоки океанической адвекции тепла для разрезов 1 и 2 при направлении на север, для разреза 4 – на восток, интегральные по району атмосферные потоки тепла «+» – из океана в атмосферу, интегральный по району радиационный баланс «+» – в океан).



## Приложение 7

Графики среднего многолетнего сезонного хода интегральных потоков тепла (Вт) для района 2: а) океанических и атмосферных потоков тепла, б) радиационного баланса для 2 района исследования (положительные потоки океанической адвекции тепла для разрезов 2 и 3 при направлении на север, для разрезов 5 и 6 – на запад, интегральные по району атмосферные потоки тепла «+» – из океана в атмосферу, интегральный по району радиационный баланс «+» – в океан).



## Приложение 8

Графики среднегодового временного хода интегрального по районам исследования радиационного баланса (Вт): а) 1 район, б) 2 район.

