

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В ЛЕТНЕЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД

И.А. Репина^{1,2}, А.Ю. Артамонов¹, М.И. Варенцов^{2,1}, Е.М. Хавина³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

³Московский физико-технический институт

✉ repina@ifaran.ru, arseniy@ifaran.ru, mvar91@gmail.com, khavina.lx@gmail.com

Одним из основных вопросов проблемы взаимодействия океана и атмосферы является описание процессов энергомассообмена. В наиболее сложном виде эти процессы представлены в Арктическом бассейне, так как ледяной покров определяет изменение альбедо, потоки тепла и влаги, а также динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой. В работе представлены результаты экспериментальных исследований турбулентного взаимодействия атмосферы и морской поверхности в летний и осенний период в центральных и шельфовых зонах Северного Ледовитого океана. Сравнение судовых наблюдений с данными реанализа и мезомасштабного моделирования показывает, что реанализы плохо воспроизводят турбулентные потоки в северной полярной области, особенно в осенний период. Это связано как с недостаточной разработанностью параметризаций для определения коэффициентов обмена в алгоритмах расчета турбулентных потоков, так и со сложностью определения температуры поверхности, покрытой льдом различной сплоченности.

Ключевые слова: взаимодействие атмосферы и океана, турбулентные потоки тепла, морской лед, реанализы.

AIR-SEA INTERACTION IN THE ARCTIC OCEAN FROM MEASUREMENTS IN THE SUMMER-AUTUMN PERIOD

I.A. Repina^{1,2}, A.Yu. Artamonov³, M.I. Varentsov^{2,1}, E.M. Khavina³

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,

²M.V. Lomonosov Moscow State University

³Moscow Institute of Physics and Technology

One of the main issues of the problem of the air-sea interaction is the description of energy and mass transfer processes. In the most complex form, its processes are presented in the Arctic basin, since the ice cover determines the albedo change, heat and moisture fluxes, as well as the dynamic interaction between the ocean and the atmosphere. The paper presents the results of experimental studies of the turbulent air-sea interaction in the summer and autumn in the central and shelf zones of the Arctic Ocean. A comparison of ship observations with reanalysis and mesoscale modeling data shows that reanalyses poorly reproduce turbulent flows in the northern polar region, especially in the autumn period. This is due to both the insufficient development of the parameterizations for determining the exchange coefficients in the algorithms for calculating turbulent flows, and the difficulty in determining the temperature of the surface covered with ice of various concentrations.

Keywords: air-sea interaction, turbulent heat fluxes, sea ice, reanalysis.

Введение

Мелкомасштабные процессы, не представляемые явно в климатических или региональных моделях с разрешением от 1 до 100 км, играют ключевую роль в системе взаимодействия «атмосфера-лёд-океан» в полярных районах.

Эти процессы включают турбулентное перемешивание в атмосфере и океане; микрофизику облаков и аэрозолей; радиационный перенос в атмосфере, через лёд и снег и в верхнем слое океана; турбулентный обмен импульсом, теплом и веществом в системе океан-лёд-снег-атмосфера; мелкомасштабные процессы в морском льду; нарастание и таяние льда; влияние топографии в прибрежных зонах и на континентальном шельфе на динамику океана и атмосферы [1]. Именно подсеточные процессы вносят основной вклад в полярное усиление – наблюдаемое в настоящее время более быстрое потепление в Арктике в сравнении с другими регионами [2-5]. С другой стороны, недостаточно надежные параметризации мелкомасштабных явлений служат основной причиной ошибок климатических и региональных моделей в определении теплового баланса Арктики. Комплексные эксперименты последних десятилетий собрали значительный фактический материал о характеристиках энергообмена в полярных районах [6-8]. Но даже такой значительный эксперимент как SHEBA (Surface Heat Budget of the Arctic Ocean) так и не дал ответа на вопрос как уменьшить расхождение модельных и экспериментальных данных в определении турбулентных потоков в полярных районах [9,10].

Основная причина ошибок моделей и реанализов заключается в том, что при моделировании погоды и климата в Арктике используются параметризации подсеточных процессов, разработанные для средних широт. Но структура пограничных слоев в атмосфере и океане в Арктике имеет определенные особенности в сравнении со средними и тропическими (субтропическими) широтами. Прежде всего, в Арктике в зимний период наблюдается долгоживущий устойчивый атмосферный пограничный слой (АПС),

который по своей структуре отличается от ночного устойчивого АПС средних широт [11]. Арктический АПС более подвержен влиянию движения внутренних гравитационных волн, в нем формируются долгоживущие температурные, ветровые и влажностные инверсии. Также полярным регионам свойственна поверхность сложной структуры: здесь присутствуют льды различной толщины, покрытые торосами, снежниками, гладкие и со снежным покровом; полыньи и трещины различной протяженности; большие участки открытой воды во взволнованном состоянии [12]. В результате, воздушный поток, переходя с одной поверхности на другую, трансформируется, и возникает сложная система внутренних пограничных слоев. Обменные процессы зависят от сплоченности, толщины льда, степени его заснеженности и восторошенности, направления воздушного потока, площади полыней и трещин, наличия поземки и многих других часто трудно-формализуемых факторов [13]. Хотя Арктический пограничный слой, как правило, имеет устойчивую или нейтральную стратификацию, конвективные пограничные слои тоже являются важной характеристикой Арктической атмосферы. Обычно они образуются при чередовании льда и открытой воды, что приводит к сильным градиентам температуры в приземном слое атмосферы. Влияние участков открытой воды на атмосферу сильно зависит от сезона – оно более выражено зимой, чем летом [14, 15]. Конвекция возникает над разводьями, полыньями и над открытым океаном при холодных вторжениях. Так как эти процессы сильно отличаются по масштабам, требуется разработка специальных параметризаций для каждой структуры. Разводья вносят значительный вклад в тепловой баланс Арктики в зимний период [16], но теплоотдача через них зависит не только от общей площади, но и от их конфигурации [17, 18] – перенос тепла через небольшие разводья более эффективен, чем через широкие и протяженные. Неотъемлемой особенностью арктических морей являются так называемые заприпайные полыньи [19, 20].

Они систематически образуются в зимний период между неподвижным припаем и сплоченными дрейфующими льдами и представляют собой значительные пространства чистой воды и молодых льдов толщиной до 30 см. В результате отдачи тепла в атмосферу в полыньях происходит интенсивное ледообразование, которое, в свою очередь, приводит к формированию уплотненной воды, влияющей на гидрологические процессы на шельфе [21]. Конвективные процессы над полыньями влияют на температурную структуру АПС, его динамику [22, 23], на облакообразование. Но турбулентные потоки зависят от направления ветра, конфигурации края полыни и расстояния от края. В отличие от разводий и полыней, развитая атмосферная конвекция в Арктике возникает только при холодных вторжениях в прикромочной зоне морских льдов [24]. Зоны с экстремальными значениями потоков тепла из океана охватывают большие пространства, что приводит к формированию мезомасштабных циркуляций, в том числе полярных мезоциклонов, изменению теплового и ветрового режима АПС.

Следовательно, ледяной покров определяет изменение альбеда, потоки тепла

и влаги, а также динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой [25, 26]. Полярной зимой лед препятствует теплообмену, но при наличии участков открытой воды (полыней, разводий) из-за большой разницы температур вода-воздух турбулентные потоки тепла возрастают в десятки раз [23, 27]. На формирование термического режима приводного слоя атмосферы существенное влияние оказывают и фазовые превращения на поверхности океана, связанные с замерзанием водной поверхности и таянием льдов. При экспериментальном изучении теплового баланса Арктики, особенно в случае полыней, разводий и молодых льдов, окруженных многолетним ледяным полем, особую трудность представляет определение вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги. В настоящее время общепринятыми являются так называемые аэродинамические балк-формулы, которые используют стандартные метеорологические характеристики и эмпирические коэффициенты обмена [28]. В свою очередь, данные коэффициенты обмена зависят как от метеорологических условий, так и от состояния поверхности.



Рисунок 1 — Процессы взаимодействия атмосферы и покрытой льдом поверхности в Арктике.

На рисунке 1 представлена диаграмма взаимосвязи структуры поверхности, характеристик атмосферного пограничного слоя и обменных процессов в Арктике: различные процессы связаны не только с процессами в другой системе, но и между собой внутри одной системы. Параметризация этих связей представляется достаточно сложной задачей.

Разработка параметризаций обменных процессов в Арктике основана на моделировании и данных специализированных экспериментов. Поэтому крайне важным является проведение комплексных экспериментов по исследованию энергетического баланса над различными поверхностями и при различных фоновых условиях.

Экспериментальные исследования теплового баланса в Арктике

Для анализа используются данные экспериментальных наблюдений характеристик энергообмена в Арктике в период с 2004 по 2015 гг. в рамках международного проекта NABOS (Nansen and Amundsen basin observation system), главная задача которого состоит в исследовании роли процессов трансформации Атлантических вод по пути их распространения в Северном Ледовитом океане вдоль границы материкового склона Арктического бассейна в северных частях морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского в формировании современных климатических изменений в Арктике [29]. Но атмосферные исследования также являются важной составной частью проводимых в рамках проекта экспедиций. В их процессе проводилось непрерывное измерение составляющих энергетического баланса в приводном слое атмосферы, а также анализ энергообмена атмосферы и подстилающей поверхности при различных метеоусловиях и условиях атмосферной стратификации с помощью инструментальных измерений потоков тепла, влаги, импульса и радиационного обмена в приповерхностном слое атмосферы. В основном, измерения проводились в центральных районах Арктики на границах континентального шельфа.

В период с 2004 по 2009 год работы велись с борта ледокола «Капитан Драницын», в 2013 году использовалось научно-экспедиционное судно (НЭС) «Академик Федоров», а в 2015 – НЭС «Академик Трешников». Исследования проводились в августе-сентябре, за исключением 2008 года, когда экспедиция проходила в октябре. Ледовые условия в этот период года характеризуются разнообразными типами льда: образующиеся начальными и молодыми льдами, однолетние и многолетние льды, льды покрытые торосами и снежницами, льды с разводьями. Стратификация атмосферы в это время, как правило, нейтральная или неустойчивая. Над полями многолетнего льда в холодные дни наблюдались и устойчивые пограничные слои.

Измерения атмосферных параметров проходили непрерывно по всему маршруту экспедиций, в том числе и на ледовых станциях. Для вычисления турбулентных потоков скрытого и явного тепла и импульса использовался метод турбулентных пульсаций (Eddy-covariance) [30]. При вычислении потоков применялись спектральная коррекция; коррекция акустической температуры; коррекция наклона анемометра. Для проверки качества получаемых данных использовался спектральный анализ и статистические тесты. Интервал осреднения брался 20 мин с 10-минутным смещением. Для коррекции движения судна использовался метод, изложенный в работе Edson J.V. и др., 1998 [31]. Скрытый поток тепла или поток влаги либо измерялся напрямую (2005-2009), либо рассчитывался профильным методом (2013, 2014) [32, 33].

В таблице 1 приведены статистические характеристики потоков тепла и влаги, полученные в разные годы.

На рисунке 2 показано распределение значений потоков явного и скрытого тепла за период 2004-2009, 2013, 2015 годы в море Лаптевых в периоды наблюдений. В основном, среднее значение потоков близко к нулю с преобладанием слабонеустойчивых условий, что связано с наличием снежниц на поверхности льда и более теплой, чем воздух температурой поверхности открытой воды в этот

Статистические характеристики турбулентных потоков тепла и влаги в центральных районах Арктики в период 2004-2015 гг. по данным судовых наблюдений.

Годы	2004 сентябрь	2005 август- сентябрь	2006 август- сентябрь	2007 сентябрь	2008 октябрь	2009 август	2013 сентябрь	2015 сентябрь
Поток явного тепла H Вт/м ²								
Мин	-24.9	-31.7	-22.7	-12.3	-70.4	-24.4	-26.5	-12.9
Макс	111.4	73.7	91.5	125.6	239.5	63.6	49.7	102.2
Среднее	4.4	5.5	21.0	25.7	31.0	9.2	1.3	26.5
STD	16.9	17.5	24.4	23.3	49.5	13.9	8.3	16.6
Поток скрытого тепла (влаги) LH Вт/м ²								
Мин		-13.0	-0.3	0.3	-16.1	-12.9	-11.1	-3.7
Макс		56.4	110.5	135.8	84.2	65.0	41.6	128.4
Среднее		9.8	24.3	38.7	19.9	11.6	5.4	26.6
STD		12.7	23.9	26.7	17.4	13.6	6.5	21.9

период года. Наибольшие разбросы значений и положительные величины потоков явного и скрытого тепла наблюдались в 2007, 2008 и 2015 годах.

В 2007 году все измерения проводились над открытой водой, температура которой была выше, чем температура воздуха. В тот год наблюдался первый минимум площади ледяного покрова, океан аккумулировал значительное количество тепла – и ледообразование началось позже, чем в предыдущие годы. В 2008 году при низких температурах и начале интенсивного позднего ледообразования наблюдалось разнообразие ледовых условий с преобладанием зон разводий, что и объясняет преимущественно положительные потоки тепла. В 2006 году при относительно низких температурах маршрут судна проходил через ледяные поля, покрытые снежниками и разводьями, что и объясняет преимущественно положительные потоки тепла. В 2015 году положительные потоки тепла и влаги были вызваны синоптической ситуацией, а именно адвекцией холодных воздушных масс с покрытой льдом поверхности океана на относительно теплую открытую поверхность. Это привело к интенсификации теплообмена в приповерхностном слое

атмосферы: вклад турбулентного обмена по сравнению с наблюдениями в том же регионе в 2013 году увеличился в несколько раз. Соответственно, увеличился и общий тепловой баланс [34, 35]. Приведенный анализ показывает, что основное влияние на тепловой баланс в Арктике оказывают два фактора: наличие открытой воды в осенне-зимний период и синоптические условия (холодные и теплые вторжения в прикромочной зоне морских льдов).

Данных экспериментальных наблюдений состояния атмосферы в Арктике, особенно в центральной ее части, по-прежнему крайне мало. Поэтому для исследования климатической изменчивости используются атмосферные реанализы. Было проведено сравнение судовых измерений вдоль маршрутов судна с данными основных реанализов:

NCEP-NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>),

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

ASR (Arctic System Reanalysis, <http://rda.ucar.edu/datasets/ds631.0/>).

Arctic System Reanalysis (ASR) – региональный реанализ, полученный с

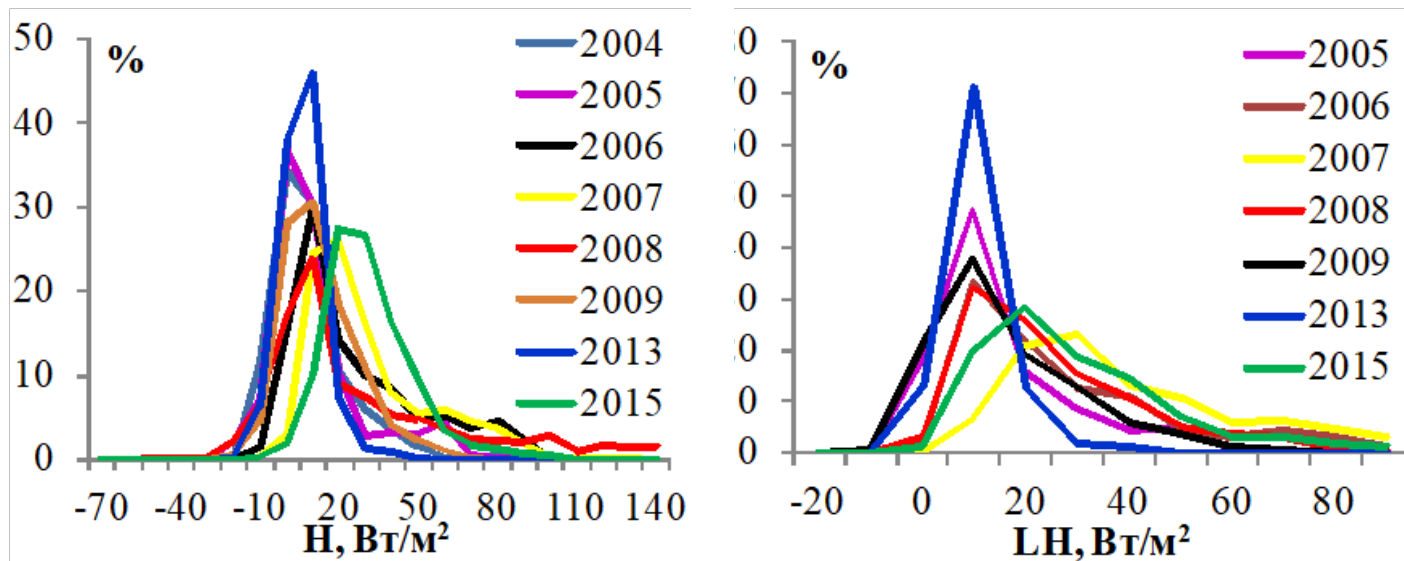


Рисунок 2 — Распределение значений потоков явного и скрытого тепла за период 2004-2008 годы в море Лаптевых в летне-осенний период.

помощью динамического даунскейлинга глобального реанализа ERA-Interim моделью PWRF (Polar Weather Forecast Model) с использованием оптимизированной для Арктики системы усвоения данных для охватывающего большую часть северного полушария домена [14, 36].

Также использовалась региональная мезомасштабная негидростатическая модель атмосферы COSMO-CLM [37] климатическая версия модели COSMO, разрабатываемая одноименным консорциумом (Consortium for Small-scale Modeling) во главе с немецкой службой погоды DWD (Deutscher Wetter Dienst) и свободно распространяемая для научного использования в рамках сообщества CLM (Climate Limited-area Modelling Community, ww.clm-community.eu).

Для сравнения использовались данные наблюдений, наиболее близкие по времени к расчетному времени реанализа по маршруту движения судна, проходящему через ячейку реанализа.

На рисунке 3 приведены результаты сравнения данных измерений турбулентных потоков тепла (H) и влаги (LH) по маршруту судна с реанализами. Для анализа взято два года: 2008 и 2013. В 2013 году наблюдалась небольшая изменчивость потоков и их значения, в основном, были близки к нулю, в 2008 году, напротив, значения потоков были большие из-за холодных условий и движения судна в зоне развоидий.

В оба года и реанализы, и мезомасштабные модели дают ошибки в определении потоков, особенно значимые при неустойчивой стратификации атмосферы. В 2008 году наблюдалось регулярное значительное занижение потоков реанализами. Правда, здесь необходимо учитывать, что при движении во льдах судно выбирает оптимальный маршрут следования через зоны развоидий – и интегральная сплоченность ледяного покрова и, соответственно, температура поверхности в ячейке реанализа может отличаться от условий по маршруту движения судна.

Для расчета потоков в реанализах применяется алгоритм COARE (https://coaps.fsu.edu/COARE/flux_algor/), в последние версии которого включены параметризации для расчета турбулентных потоков надо льдом и в штормовых условиях при наличии пены и брызг [38]. Входными данными для алгоритма служат метеорологические данные, полученные из реанализа.

Для определения применимости алгоритма COARE при расчете потоков в Арктике, потоки, полученные из судовых измерений, сравнивались с потоками, рассчитанными по версии COARE-3 с использованием получаемой в экспедициях метеорологической информации. Температура поверхности измерялась с помощью ИК-радиометра.

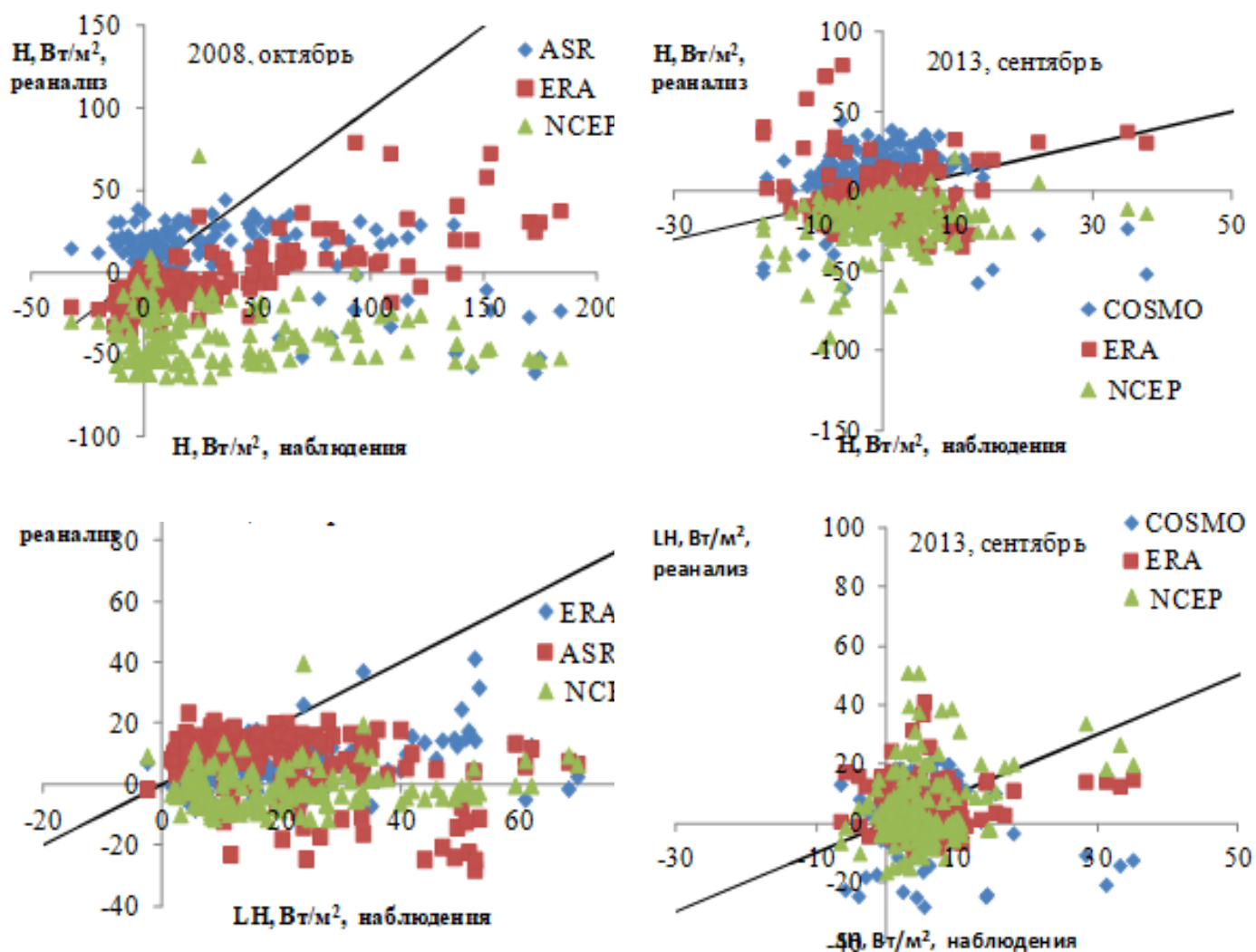


Рисунок 3 — Сравнения данных измерений турбулентных потоков тепла (H) и влаги (LH) по маршруту движения судна с реанализами.

В таблице 2 приведены коэффициенты корреляции рассчитанных и измеренных потоков явного и скрытого тепла по всему массиву данных, разделенных по скоростям ветра и условиям стратификации, а также по типу подстилающей поверхности (открытая вода, лёд). В большинстве случаев уровень значимости корреляции не ниже 90%. Алгоритм хорошо воспроизводит потоки как над водой, так и надо льдом при умеренных скоростях ветра и стратификации близкой к нейтральной. При сильных и слабых ветрах, а также при наличии стратификации ошибки алгоритма увеличиваются, но все равно коэффициенты корреляции больше, чем при сравнении с данными реанализов. Над открытой водой во всех случаях алгоритм работает лучше, чем над покрытой льдом поверхностью. Следовательно, причина больших расхождений не в качестве используемых параметризаций.

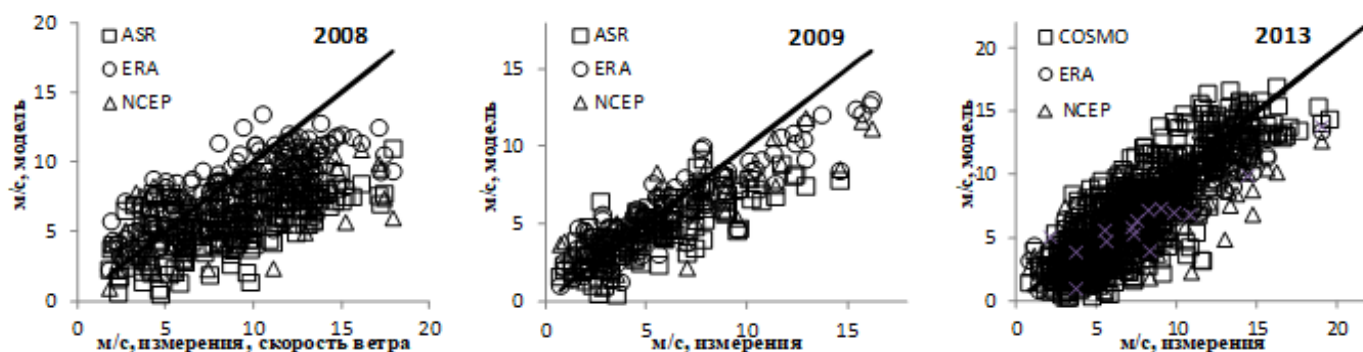
Проведем сравнение скорости приземного ветра и температур поверхности и приземного воздуха по данным судовых измерений и реанализов. Ошибки, сравнимые с наблюдаемыми в Арктике трендами, в воспроизведении основных метеорологических полей реанализами отмечались и ранее [10, 39, 40]. В нашем случае (Рис. 4) скорость ветра и приземная температура во все годы восстанавливается достаточно хорошо. Реанализы занижают приземную скорость ветра при сильных ветрах и дают ошибки как в сторону завышения так и занижения при низких отрицательных температурах.

Но при воспроизведении температуры поверхности уровень ошибок вырастает (Рис 4-в). И если в случаях открытой воды или сплошного льда данные наблюдений и реанализа практически совпадают, то в случае неоднородных ледяных массивов и в прикромочных зонах разброс очень велик. Это связано, как уже говорилось ранее, с выбором оптимального

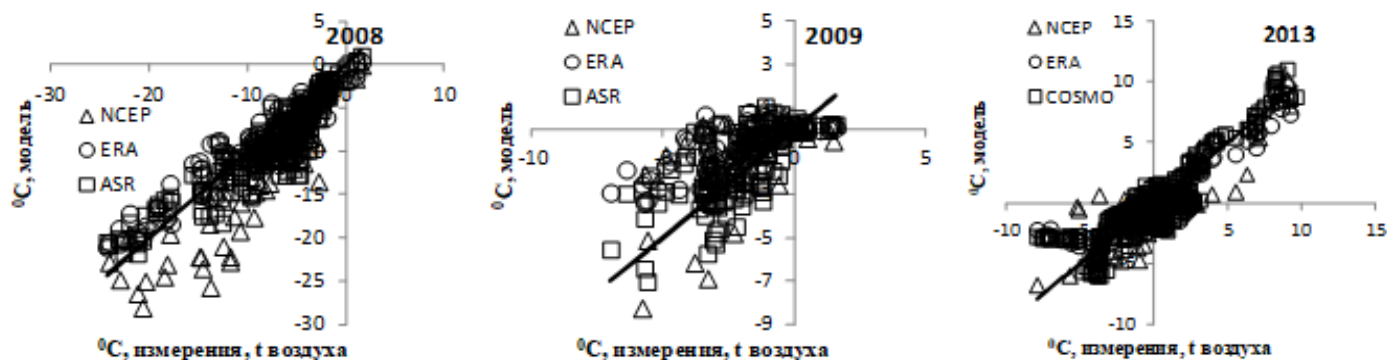
Коэффициенты корреляции рассчитанных и измеренных потоков явного и скрытого тепла при различных условиях.

Скорость Ветра, м/с (количество случаев)	Поток тепла, Н		Поток влаги LH	
	COARE вода	COARE лёд	COARE вода	COARE лёд
0-5 (325)	0.68	0.63	0.65	0.52
5-15 (687)	0.88	0.86	0.87	0.85
>15 (83)	0.57	0.38	0.51	0.41
Параметр устойчивости $\xi=z/L$				
$0.05 < \xi$ (305)	0.52	0.48	0.58	0.43
$-0.05 < \xi < 0.05$ (685)	0.87	0.8	0.82	0.79
$\xi < -0.05$ (413)	0.7	0.63	0.71	0.62

а)



б)



в)

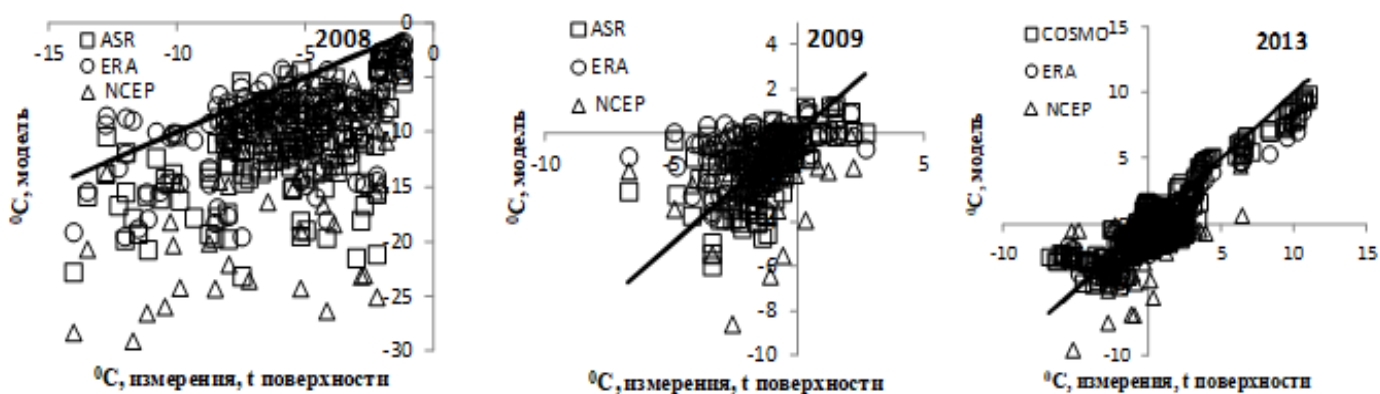


Рисунок 4 — Сравнение судовых измерений с данными реанализов и мезомасштабного моделирования за октябрь 2008, август 2009 и сентябрь 2013. а) скорость приводного ветра, б) температура воздуха на высоте 2 м., г) температура поверхности.

маршрута движения судна в зоне разво- дий. Но также и с ошибками в восстано- влении сплоченности морского льда по спутниковым данным, которая исполь- зуется для восстановления температуры покрытой льдом морской поверхности [41,42].

На рис. 5 приведено сравнение резуль- татов расчетов среднесуточного потока тепла с использованием данных о сплоченности льда по различным алгоритмам и данных визуальных наблюдений, полу- ченных во время работ на ледоколе «Ка- питан Драницын» в октябре 2008 года. Видно, что значения потоков, особенно в прикромочной зоне, могут различаться более чем на порядок.

Заключение

Настоящая статья представляет резуль- таты прямых измерений характе- ристик энергообмена над различными типами льда в центральных и прибреж- ных районах Арктики в летний и осен- ний периоды. Установлено, что в осен- не-зимний период влияние толщины и сплоченности льда на турбулент- ный энергообмен в атмосфере может быть значительным. Над участками от- крытой воды и тонкого молодого льда вклад турбулентного обмена в тепло- вой баланс превосходит радиационный.

Наблюдается положительный поток теп- ла над зонами разводий и отрицатель- ный над многолетними льдами. Поток тепла оказывается зависим от наличия пространственных неоднородностей на поверхности льда – торосов, снежниц, разводий и пр. Усиление турбулентно- го энергообмена наблюдается в при- кромочной зоне, что приводит к интен- сификации атмосферных процессов в прикромочной зоне в осенний период.

Сравнение судовых наблюдений с дан- ными реанализа и мезомасштабного мо- делирования показывает, что реанализы плохо воспроизводят турбулентные по- токи в северной полярной области, осо- бенно в осенний период. Это связано как с недостаточной разработанностью па- раметризаций для определения коэф- фициентов обмена в алгоритмах расчета турбулентных потоков, так и со сложно- стью определения температуры поверх- ности, покрытой льдом различной сплоченности.

Благодарности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 17-05-01221 и 18-05-60184.

Acknowledgments.

The reported study was funded by RFBR according to the research projects № 17-05-01221 and 18-05-60184.

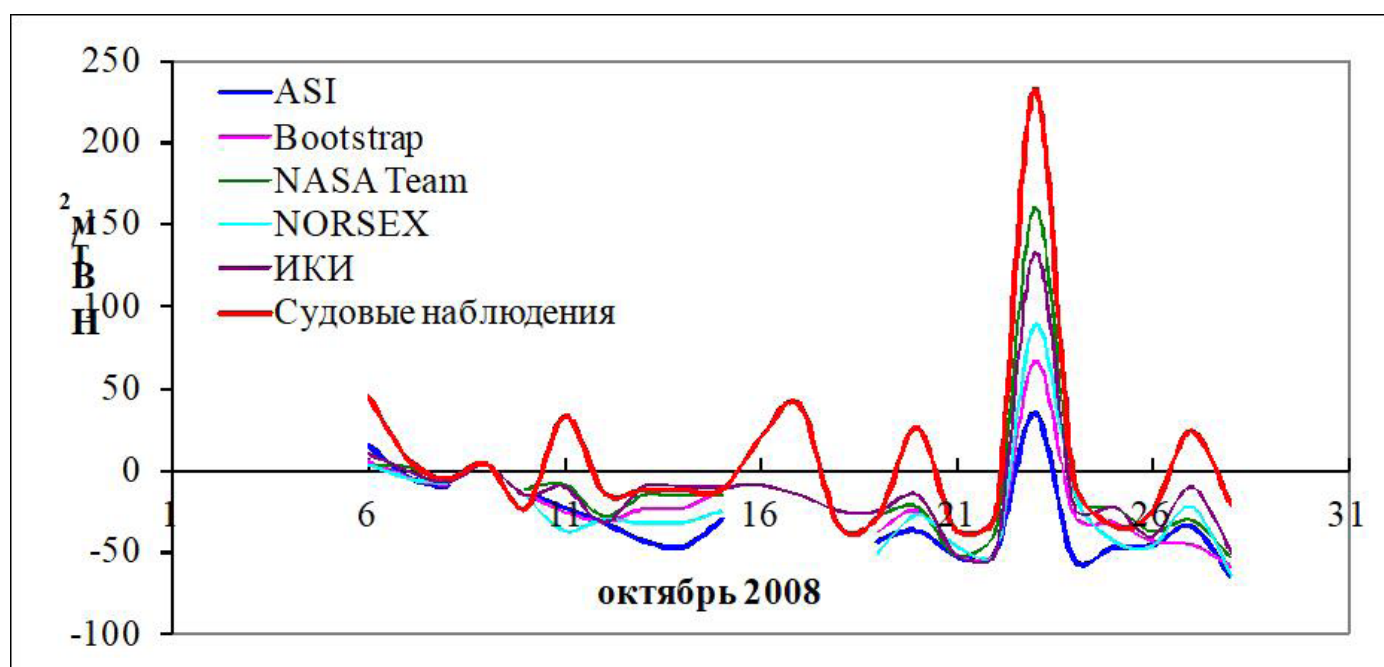


Рисунок 5 — Среднесуточный поток тепла, рассчитанный с использованием данных о сплоченности ледяного покрова, полученных из визуальных судовых наблюдений и различных алгоритмов обработки спутниковых пассивных микроволновых данных.

Список литературы:

1. Vihma T., Pirazzini R., Fer I., Renfrew I.A., Sedlar J., Tjernström M., Lüpkes C., Nygård T., Notz D., Weiss J., Marsan D., Cheng B., Birnbaum G., Gerland S., Chechin D., Gascard J.C. Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: a review // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 9403–9450.
2. Flanner M.G., Shell K.M., Barlage M., Perovich D.K., Tschudi M.A.: Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008 // *Nature Geosci.* 2011. V. 4. P. 151–155.
3. Graverson R.G., Wang M. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo // *Clim. Dynam.* 2009. V. 33. P. 629–643.
4. Graverson R.G., Mauritsen T., Tjernström M., Källen E., Svensson, G. Vertical structure of recent Arctic warming // *Nature.* 2008. V. 451. P. 53–56.
5. Hudson S.R. Estimating the global radiative impact of the sea ice–albedo feedback in the Arctic // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. D16102.
6. Andreas E.L., Jordan R.E., Makshtas A.P. Parameterizing turbulent exchange over sea ice: the ice station Weddell results // *Boundary Layer Meteorology.* 2005.V. 114.P. 439–460.
7. Jordan R.E., Andreas E.L., Makshtas A.P. The heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4 // *Journal of Geophysical Research.* 1999.V. 104. P.7785-7806.
8. Persson P.O.G., Fairall C.W., Andreas E.L., Guest P.S., Perovich D.K. Measurement near the Atmospheric Surface Flux Group tower at SHEBA: near surface conditions and surface energy budget // *J. Geophys. Res.* 2002.V.107 (C10).
9. Beesley J.A., Bretherton C.S., Jakob C, Andreas E.L., Intrieri J.L., Uttal T.A. A comparison of the cloud and boundary layer variables in the ECMWF forecast model with observations at SHEBA ice camp.// *Journal of Geophysical Research.* 2000. Vol.105. N12. P.337-12349.
10. Chaudhuri A.H., Ponte R.M., Nguyen A.T. A comparison of atmospheric reanalysis products for the Arctic Ocean and implications for uncertainties in air–sea fluxes // *Journal of Climate.* 2014. V. 27(14). P.5411-5421.
11. Zilitinkevich S.S., Esau I.N. Resistance and heat-transfer laws for stable and neutral planetary boundary layers: old theory advanced and re-evaluated // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2005. V. 131. P. 1863–1892.
12. Lüpkes C., Gryanik V.M., Rösel A., Birnbaum G., Kaleschke L. Effect of sea ice morphology during Arctic summer on atmospheric drag coefficients used in climate models // *Geophysical Research Letters.* 2013. Vol. 40(2). P. 446–451.
13. Волков Ю.А., Репина И.А. Влияние структуры подстилающей поверхности в полярных районах на энергообмен атмосферы и океана // Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. Спб.: Гидрометеиздат, 2002. Гл. 11. С. 189–206.
14. Bromvich D.H., Hines K.M., Bai L.S. Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting Model: 2. Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D08122.
15. Kay J.E., Raeder K., Gettelman A., Anderson J. The boundary layer response to recent Arctic sea ice loss and implications for high-latitude climate feedbacks // *J. Climate,* 2011. V.24, P. 428–447.
16. Lüpkes C., Vihma T., Birnbaum G., Wacker U. Influence of leads in sea ice on the temperature of the atmospheric boundary layer during polar night // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L03805.
17. Esau I.N. Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: large-eddy simulation study // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D08109.
18. Marcq S., Weiss, J. Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere // *The Cryosphere.* 2012. V. 6. P. 143–156.
19. Атлас ледяных образований. Под общей редакцией В.М. Смоляницкого СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с.
20. Tamura T., Ohshima K.I. Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. No. C07030.
21. Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modelling of dense water cascading from the Laptev Sea shelf // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C09003. P. 1–15.
22. Репина И.А., Аниферов А.А. Исследование динамики атмосферного пограничного слоя над заприпайной полыней моря Лаптевых по данным WRF-моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 275–288.
23. Репина И.А., Чечин Д.Г. Влияние полыней и разводий в Арктике на структуру атмосферного пограничного слоя и региональный климат // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 4. С. 162–172.
24. Chechin D.G., Lüpkes C., Repina I.A., Gryanik V.M. Idealized dry quasi 2-D mesoscale simulations of cold-air outbreaks over the marginal sea ice zone with fine and coarse resolution // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 8787–8813.
25. Репина И.А., Артамонов А.Ю., Смирнов А.С., Чечин Д.Г. Исследование взаимодействия океана и атмосферы в полярных районах в рамках международного полярного года // Метеорологические и геофизические исследования. Под ред. Г.В. Алексеева. М. - СПб., 2011. С. 236–250.
26. Макштас А.П. Тепловой баланс Арктических льдов в зимний период. / Л.: Гидрометеиздат, 1984. 87 с.
27. Maykut C.A. Energy exchange over young sea ice in the central Arctic // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. P. 3646–3658.
28. Репина И.А., Смирнов А.С. Обмен теплом и

- импульсом между атмосферой и льдом по данным наблюдений в районе Земли Франца-Иосифа // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2000. Т.36. №5. С. 672-680.
29. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ashik I.M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fortier L., Gascard J.-C., Hansen E., Hölemann J., Ivanov V.V., Kikuchi T., Kirillov S., Lenn Y.-D., McLaughlin F.A., Piechura J., Repina I., Timokhov L.A., Walczowski W., Woodgate R. Fate of early 2000s arctic warm water pulse // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. Vol. 92. № 5. P. 561-566.
 30. Burba G. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA. 2013. 331 p.
 31. Edson J.B., Hinton A.A., Prada K.E., Hare J.E., Fairall C.W. Direct Covariance Flux Estimates from Mobile Platforms at sea // J. Atmos. Oceanic Technol. 1998. V.15. P. 547-562.
 32. Репина И.А. Методы определения турбулентных потоков над морской поверхностью. / Москва: ИКИ РАН, 2007. 36 с.
 33. Тимачев В.Ф., Иванов Б.В., Репина И.А, Теплообмен между атмосферой и ледовым покровом // Труды ААНИИ. 2008. В.447. С.140-155.
 34. Варенцов М.И., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Хавина Е.М., Матвеева Т.А. Экспериментальные исследования энергообмена и динамики атмосферного пограничного слоя в Арктике в летний период // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 95-127.
 35. Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E. Arctic Sea Ice Decline in the 2010s. The Increasing Role of the Ocean – Air Heat Exchange in the Late Summer // Atmosphere. 2019. Vol. 10, no. 4. P. 184(1) –184(23).
 36. Wilson A.B., Bromwich D.H., Hines K.M. Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis Domain: 2. Atmospheric hydrologic cycle // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. D04107.
 37. Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM - the climate version of LM: Brief description and long-term applications // COSMO Newsletter. 2006. V. 6. P. 225-235.
 38. Fairall C., Bradley E., Hare J., Grachev A., Edson J. Bulk parameterizations of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate. 2003. V. 16. P. 571–591.
 39. Jakobson E., Vihma T., Palo T., Jakobson L., Keernik H., Jaagus J.: Validation of atmospheric reanalyses over the central Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L10802.
 40. Lüpkes C., Vihma T., Jakobson E., König-Langlo G., Tetzlaff A. Meteorological observations from ship cruises during summer 2 to the central Arctic: A comparison with reanalysis data // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. L09810.
 41. Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор. // Исследование Земли из космоса. V. 2016. № 4. С. 65–84.
 42. Ivanova N.O., Johannessen M., Pedersen L.T., Tonboe R.T. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2014. V. 52. №11. P. 7233–7246.

References:

1. Vihma T., Pirazzini R., Fer I., Renfrew I.A., Sedlar J., Tjernström M., Lüpkes C., Nygård T., Notz D., Weiss J., Marsan D., Cheng B., Birnbaum G., Gerland S., Chechin D., Gascard J.C. Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: a review // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 9403–9450.
2. Flanner M.G., Shell K.M., Barlage M., Perovich D.K., Tschudi M.A.: Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008 // Nature Geosci. 2011. V. 4. P. 151–155.
3. Graverson R.G., Wang M. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo // Clim. Dynam. 2009. V. 33. P. 629–643.
4. Graverson R.G., Mauritsen T., Tjernström M., Källén E., Svensson, G. Vertical structure of recent Arctic warming // Nature. 2008. V. 451. P. 53–56.
5. Hudson S.R. Estimating the global radiative impact of the sea ice–albedo feedback in the Arctic // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D16102.
6. Andreas E.L., Jordan R.E., Makshtas A.P. Parameterizing turbulent exchange over sea ice: the ice station Weddell results // Boundary Layer Meteorology. 2005.V. 114.P. 439-460.
7. Jordan R.E., Andreas E.L., Makshtas A.P. The heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4 // Journal of Geophysical Research. 1999.V. 104. P.7785-7806.
8. Persson P.O.G., Fairall C.W., Andreas E.L., Guest P.S., Perovich D.K. Measurement near the Atmospheric Surface Flux Group tower at SHEBA: near surface conditions and surface energy budget // J. Geophys. Res. 2002.V.107 (C10).
9. Beesley J.A., Bretherton C.S., Jakob C, Andreas E.L., Intrieri J.L., Uttal T.A. A comparison of the cloud and boundary layer variables in the ECMWF forecast model with observations at SHEBA ice camp.// Journal of Geophysical Research. 2000. Vol.105. N12. P.337-12349.
10. Chaudhuri A.H., Ponte R.M., Nguyen A.T. A comparison of atmospheric reanalysis products

- for the Arctic Ocean and implications for uncertainties in air–sea fluxes // *Journal of Climate*. 2014. V. 27(14). P.5411-5421.
11. Zilitinkevich S.S., Esau I.N. Resistance and heat-transfer laws for stable and neutral planetary boundary layers: old theory advanced and re-evaluated // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2005. V. 131. P. 1863–1892.
 12. Lüpkes C., Gryanik V.M., Rösel A., Birnbaum G., Kaleschke L. Effect of sea ice morphology during Arctic summer on atmospheric drag coefficients used in climate models // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40(2). P. 446-451.
 13. Yu.A. Volkov, I. A. Repina Air-sea interaction in the polar in the polar regions. DOI: 10.29006/978-5-9901449-3-4-2017-1-140-143
 14. Bromvich D.H., Hines K.M., Bai L.S. Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting Model: 2. Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D08122.
 15. Kay J.E., Raeder K., Gettelman A., Anderson J. The boundary layer response to recent Arctic sea ice loss and implications for high-latitude climate feedbacks // *J. Climate*, 2011. V.24, P. 428–447.
 16. Lüpkes C., Vihma T., Birnbaum G., Wacker U. Influence of leads in sea ice on the temperature of the atmospheric boundary layer during polar night // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L03805.
 17. Esau I.N. Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: large-eddy simulation study // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D08109.
 18. Marcq S., Weiss, J. Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 143–156.
 19. Smolyanitsky, V.A. (Eds.). (2019). Atlas of ice formations. St. Petersburg.: AARI, p. 232.
 20. Tamura T., Ohshima K.I. Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. No. C07030.
 21. Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modelling of dense water cascading from the Laptev Sea shelf // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C09003. P. 1-15.
 22. Repina, I.A., Aniferov, A.A. (2018). Issledovaniye dinamiki atmosfernogo pogranichnogo sloya nad zapripaynoy polyn'yey morya Laptevykh po dannym WRF-modelirovaniya [The study of the dynamics of the atmospheric boundary layer above the pan-ice polynya of the Laptev Sea according to WRF-modeling]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa - Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. Vol. 15, . № 1. pp. 275–288.
 23. Repina, I.A. & Chechin, D.G. (2012) Vliyaniye polyney i razvodiya v Arktike na strukturu atmosfernogo pogranichnogo sloya i regional'nyy klimat [The influence of wormwood and scatter in the Arctic on the structure of the atmospheric boundary layer and regional climate]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa - Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. Vol. 4. Pp. 162-172.
 24. Chechin D.G., Lüpkes C., Repina I.A., Gryanik V.M. Idealized dry quasi 2-D mesoscale simulations of cold-air outbreaks over the marginal sea ice zone with fine and coarse resolution // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 8787–8813.
 25. Repina, I.A. & Artamonov, A.Yu. & Smitnov, A.S. & Chechin, D.G. (2011). The study of the interaction of the ocean and the atmosphere in the polar regions within the framework of the international polar year. G.V. Alekseev (Ed.). Moscow-St.Peterburg: Meteorological and geophysical studies. Pp. 236–250.
 26. Makshtas, A.P. (1984) Thermal balance of Arctic ice in winter. L.: Gidometizdat. p. 87.
 27. Maykut C.A. Energy exchange over young sea ice in the central Arctic // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. P. 3646-3658.
 28. Repina, I.A. & Smirnov, A.S. (2000). Obmen teplom i impul'som mezhdru atmosferoy i l'dom po dannym nablyudeniy v rayone Zemli Frantsasosifa [The exchange of heat and momentum between the atmosphere and ice according to observations in the Franz Josef Land region]. *Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana - Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics of the atmosphere and ocean*. Vol. 36. №5. Pp. 672-680.
 29. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ashik I.M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fortier L., Gascard J.-C., Hansen E., Hölemann J., Ivanov V.V., Kikuchi T., Kirillov S., Lenn Y.-D., McLaughlin F.A., Piechura J., Repina I., Timokhov L.A., Walczowski W., Woodgate R. Fate of early 2000s arctic warm water pulse // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011. Vol. 92. № 5. P. 561-566.
 30. Burba G. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA. 2013. 331 p.
 31. Edson J.B., Hinton A.A., Prada K.E., Hare J.E., Fairall C.W. Direct Covariance Flux Estimates from Mobile Platforms at sea // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 1998. V.15. P. 547-562.
 32. Repina, I.A. (2007). Methods for determining turbulent flows over the sea surface. Moscow: IKI RAS, p. 36.
 33. Timachev, V.F. & Ivanov, B.V. & Repina, I.A. (2008). Teploobmen mezhdru atmosferoy i ledovym pokrovom [Heat transfer between the atmosphere and ice cover]. *Trudy AANII - ARII studies*. Vol. 447. P.140-155.
 34. Varentsov, M.I. & Repina I.A. & Artamonov, A.Yu. & Khavina. E.M. & Matveeva, T.A. (2016). Experimental studies of energy transfer and the dynamics of the atmospheric boundary layer in the Arctic in the summer // *Transactions of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. Vol. 361. S. 95-127.
 35. Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E. Arctic Sea Ice Decline

- in the 2010s. The Increasing Role of the Ocean – Air Heat Exchange in the Late Summer // Atmosphere. 2019. Vol. 10, no. 4. P. 184(1)–184(23).
36. Wilson A.B., Bromwich D.H., Hines K.M. Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis Domain: 2. Atmospheric hydrologic cycle // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. D04107.
37. Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM - the climate version of LM: Brief description and long-term applications // COSMO Newsletter. 2006. V. 6. P. 225-235.
38. Fairall C., Bradley E., Hare J., Grachev A., Edson J. Bulk parameterizations of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate. 2003. V. 16. P. 571–591.
39. Jakobson E., Vihma T., Palo T., Jakobson L., Keernik H., Jaagus J.: Validation of atmospheric reanalyses over the central Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L10802.
40. Lüpkes C., Vihma T., Jakobson E., König-Langlo G., Tetzlaff A. Meteorological observations from ship cruises during summer 2 to the central Arctic: A comparison with reanalysis data // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. L09810.
41. Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarsky D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu. Satellite microwave radiometry of sea ice in the polar regions. Overview. // Exploration of the Earth from space. V. 2016. No. 4. C. 65–84. Ivanova N.O., Johannessen M., Pedersen L.T., Tonboe R.T. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2014. V. 52. №11. P. 7233–7246.