

**МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ
METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY**

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>
УДК 551.583



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ТЕПЛООБМЕН
МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И ОКЕАНОМ В АРКТИКЕ
НА ПРИМЕРЕ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ***Г.В. СУРКОВА*, В.А. РОМАНЕНКО**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия***galina_surkova@mail.ru***Резюме**

Исследована современная пространственная структура очагов турбулентного теплообмена над Баренцевым и Карским морями, в последние десятилетия она не претерпела существенных изменений по сравнению с серединой и второй половиной XX в. Показано, что в пределах акватории Баренцева моря пространственная изменчивость зимой в 5–10 и более раз может превышать летние значения. Определено, что годовые суммы потоков тепла с поверхности Баренцева моря в среднем в 3–4 и в 5–6 раз, для потоков *H* и *LE* соответственно, превышают значения для Карского моря, а в отдельные годы могут различаться в десятки раз.

Показано, что за период 1979–2018 гг. однонаправленные изменения незначительны, но значимы декадные колебания. Выявлено, что многолетние изменения суммарных турбулентных потоков над акваториями Баренцева и Карского морей довольно хорошо синхронизированы, что свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов. Наибольшая реакция полей потоков тепла на изменения атмосферы характерна для изменений индексов NAO и SCAND, и их максимум локализован в районе Мурманского и Нордкапского течений. В летнее время аномалии полей всех величин выражены крайне слабо.

Ключевые слова: Арктика, Баренцево море, Карское море, океан и атмосфера, турбулентный теплообмен.

Для цитирования: Суркова Г.В., Романенко В.А. Изменение климата и теплообмен между атмосферой и океаном в Арктике на примере Баренцева и Карского морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 280–292. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>.

Поступила 17.08.2021

После переработки 17.09.2021

Принята 19.09.2021

**CLIMATE CHANGE AND HEAT EXCHANGE BETWEEN
ATMOSPHERE AND OCEAN IN THE ARCTIC
BASED ON DATA FROM THE BARENTS AND THE KARA SEA***GALINA V. SURKOVA*, VICTOR A. ROMANENKO**Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia***galina_surkova@mail.ru*

Summary

The paper investigates the current regime of turbulent heat exchange with the atmosphere over the Barents and Kara Seas, as well as its spatial, seasonal and temporal variability (1979–2018). It is shown that over the past decades, the areas of the location of the centers of maximum energy exchange between the sea surface and the atmosphere have not changed significantly in comparison with the middle and second half of the XX century. It was revealed that the greatest seasonal and synoptic variability of heat fluxes is typical of the central and western parts of the Barents Sea. It was found that both indicators of variability in the cold season are 2–5 and more times higher than in the warm season, and the spatial heterogeneity of the indicators of variability in winter is about twice as large as in summer. Quantitative estimates have shown that, within the Barents Sea, the spatial variability of fluxes in winter may be 5–10 times or more higher than the summer values. Above the Kara Sea, the greatest heterogeneity in the fluxes field is typical of the autumn and early winter seasons. It has been found that the annual sums of heat fluxes from the surface of the Barents Sea exceed the values for the Kara Sea, on average, 3–4 and 5–6 times, for sensible and latent heat fluxes, respectively, and in some years may differ tens of times. For the period under study, a single trend of the integral fluxes over the water area and their annual magnitude is not expressed, although there are multi-year decadal fluctuations. It is shown that, despite the significant difference in the thermal regime of the Barents and Kara seas and the lower atmosphere above them, the interannual changes in the total turbulent flows are quite well synchronized, which indicates the commonality of large-scale hydrometeorological processes in these seas, which affect the energy exchange between the seas and the atmosphere.

Keywords: Arctic, Barents Sea, Kara Sea, ocean and atmosphere, turbulent heat transfer.

For Citation: *Surkova G.V., Romanenko V.A.* Climate change and heat exchange between atmosphere and ocean in the Arctic based on data from the Barents and the Kara sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 280–292. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>.

Received 17.08.2021

Revised 17.09.2021

Accepted 19.09.2021

ВВЕДЕНИЕ

Регион западного сектора Российской Арктики, в частности Баренцева и Карского морей, стратегически важен для нашей страны. Здесь активно ведется хозяйственная деятельность и развито судоходство. Этому способствует то, что Баренцево море не замерзает даже в самые суровые годы благодаря теплым морским течениям из Атлантики, но их влияние ослабевает с запада на восток. Архипелаг Новая Земля является естественной преградой для проникновения теплых вод в Карское море, однако влияние атлантических воздушных масс распространяется до восточных окраин Карского моря.

Перераспределение тепла между океаном и атмосферой осуществляется за счет турбулентных потоков явного и скрытого тепла. Их интенсивность влияет на усиление и ослабление циклонической деятельности в арктическом регионе, на адвекцию тепла и влаги. Аномалии температуры поверхности океана и потоков тепла влияют на активность западного переноса, наибольшая теплоотдача наблюдается обычно в тыловых частях циклонов, когда происходит адвекция сухого холодного воздуха и возникают наибольшие градиенты температуры суша — океан [1].

Пространственно-временные особенности полей потоков тепла, изменчивости и многолетних трендов в данном регионе многие десятилетия остаются объектом пристального изучения. Их исследование позволяет дополнить существующие знания об энергетике климатической системы в целом, факторах формирования общей циркуляции и региональных особенностях климата Арктики с точки зрения фундаментальной науки. В прикладном аспекте эти сведения позволяют уточнять влияние

изменений теплообмена между океаном и атмосферой на формирование опасных гидрометеорологических явлений в этом регионе, что в конечном счете позволяет разрабатывать стратегии минимизации наносимого ими ущерба.

Изучением потоков тепла над Арктическим бассейном занимались многие годы. В справочнике [2] представлено обобщение многолетних исследований пространственного распределения турбулентных потоков в Баренцевом и Карском морях. Работы последнего десятилетия дополняют эти исследования. В частности, в статьях К.А. Калавиччи [3], А.А. Сизова [4], И.В. Полякова [5] рассматривается крупномасштабный процесс взаимодействия атмосферы и океана в атлантическом секторе Арктики, сделан вывод о взаимосвязи турбулентных потоков тепла, площади ледяного покрова и характере атмосферной циркуляции, исследована связь с процессом «атлантизации» — ослаблением стратификации в океане, сокращением ледяного покрова в западных акваториях морей Российской Арктики, подверженных влиянию теплых вод Атлантики.

В настоящей работе представлены результаты исследования современной пространственной, временной и многолетней изменчивости турбулентных потоков явного тепла H и скрытого тепла LE в западном секторе Российской Арктики на основе современных данных реанализа, формирующегося с использованием ретроспективного численного моделирования процессов в атмосфере и океане и позволяющего выполнить количественные оценки гидрометеорологических показателей в тех районах, где данные наблюдений отсутствуют или же не позволяют выстроить многолетние ряды. Кроме того, для выявления связи потоков тепла и атмосферного давления с синоптическими условиями над данной акваторией были исследованы связи аномалий полей потоков тепла и атмосферного давления с индексами общей циркуляции атмосферы (ОЦА).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходного материала для расчетов были использованы данные о потоках H и LE между морем и атмосферой и атмосферном давлении на уровне моря по результатам реанализа Era-Interim [6; <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>] за период 1979–2018 гг. для территории $65\text{--}83^\circ$ с.ш., $20\text{--}110^\circ$ в.д. с пространственным разрешением $0,125 \times 0,125$ градусов по широте и долготе за каждые 6 ч. Расчет потоков в модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, на основе которой готовится реанализ ERA-Interim, выполняется с использованием аэродинамических балк-формул [7]. Выполненные в работе [8] сравнительные оценки разных реанализов показали хорошее соответствие модельных результатов по турбулентным потокам тепла реанализа ERA-Interim с данными независимых наблюдений. На основе данных реанализа были рассчитаны суммарные месячные и годовые потоки тепла.

Для анализа пространственной и многолетней изменчивости суммарных за месяц потоков тепла были построены диаграммы размаха («ящик с усами»). Диаграмма показывает медиану, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы. Расстояние между верхней и нижней границами «ящика» позволяет определить разброс данных — это первый и третий квартили, соответствующие 25-му и 75-му процентилем. Линия в середине — медиана, или 50-й процентиль. Концы «усов» — края статистически значимой выборки, определяемые формулами 1 и 2.

$$X1 = Q1 - k(Q3 - Q1) \quad (1)$$

$$X2 = Q3 + k(Q3 - Q1), \quad (2)$$

где $X1$ — нижняя граница «уса», $X2$ — верхняя граница «уса», $Q1$ — первый квартиль, $Q3$ — третий квартиль, k — коэффициент, равный 1,5 [9].

Для анализа многолетних изменений интегральных потоков H и LE были построены их многолетние ходы за период исследования, и при помощи линейной аппроксимации были рассчитаны их декадные тренды. Для статистической оценки связи потоков H и LE между морями были построены диаграммы рассеяния отдельно для каждого потока.

Для выявления связи потоков тепла с синоптическими условиями над данной акваторией были исследованы индексы общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и на основе данных по давлению рассчитаны среднееголетние, среднесезонные и среднемесячные поля атмосферного давления на уровне моря, их временная изменчивость для исследуемой акватории. В работе использовались следующие индексы ОЦА: североатлантической осцилляции (NAO), арктической осцилляции (АО), скандинавской осцилляции (SCAND). Их среднемесячные планетарные значения за период с 1979 по 2016 г. были получены по данным Национального управления океанических и атмосферных исследований США [<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections>].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

Сравнение особенностей пространственного распределения потоков тепла (рис. 1) с предыдущими более ранними оценками, обобщенными по результатам многолетних исследований в [2], показывает сохранение общих закономерностей расположения очагов максимальной и минимальной теплоотдачи. Можно отметить следующие пространственные детали в распределении потоков тепла. Наибольшие потоки как H , так и LE наблюдаются над южной частью Баренцева моря, в особенности над теплыми Нордкапским и Мурманским течениями, наименьшие — над севером Баренцева моря и над Карским морем в целом, поскольку данные акватории большую часть года покрыты сплошным льдом, над которым согласно экспедиционным исследованиям, например, в работе И.А. Репиной и соавторов [10], потоки тепла минимальны над сплошным льдом, значительно больше над тонким льдом с разводьями и больше всего над открытой водой.

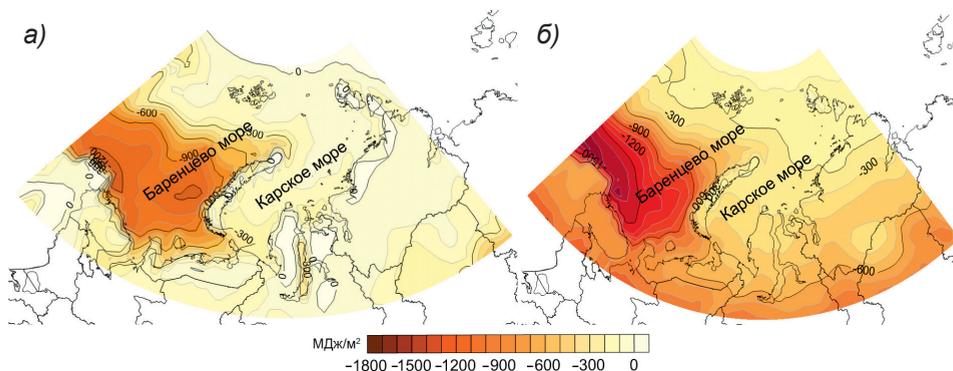


Рис. 1. Средняя годовая сумма потока явного тепла (а) и скрытого тепла (б), МДж/м²

Fig. 1. Average annual sum of sensible (a) and latent heat fluxes (b), MJ/m²

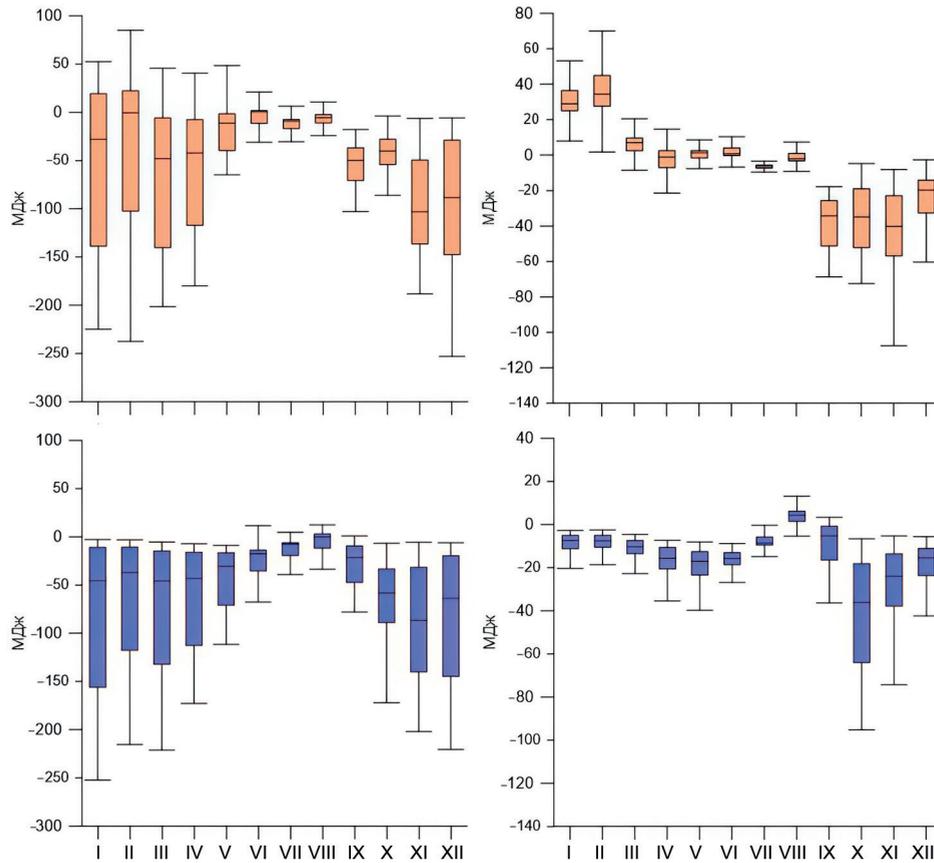


Рис. 2. Сезонный ход пространственной изменчивости потока H (наверху) и LE (внизу) на акватории Баренцева (слева) и Карского (справа) морей

Fig. 2. Seasonal changes in the spatial variability of the sensible (top) and latent heat fluxes of (bottom) in the Barents (left) and Kara (right) seas

Пространственная изменчивость турбулентных потоков (рис. 2) в Баренцевом море с января по май значительно больше, чем в Карском. Это объясняется тем, что в эти месяцы Карское море практически полностью покрыто льдом, что затрудняет теплообмен с атмосферой. В сентябре–ноябре значительная часть поверхности Карского моря освобождается ото льда, что усиливает теплообмен с атмосферой над свободной водой, поэтому пространственная изменчивость потоков выше (до $-40... -60$ МДж/мес.). Направленность слабого потока H в данном море в декабре и январе из атмосферы к океану объясняется инверсионным распределением температуры воздуха в приземном слое в условиях полярной ночи. Для Баренцева моря наиболее высокая пространственная изменчивость величины турбулентных потоков характерна в декабре–марте вследствие больших различий вертикального градиента температуры в приземном слое атмосферы между теплой южной частью моря и его холодной северной частью, большую часть года покрытой льдом. Летом и осенью разница между 25-м и 75-м перцентилями на диаграммах размаха H и LE (рис. 2) незначительна, следовательно, пространственная изменчивость потоков H и LE в это

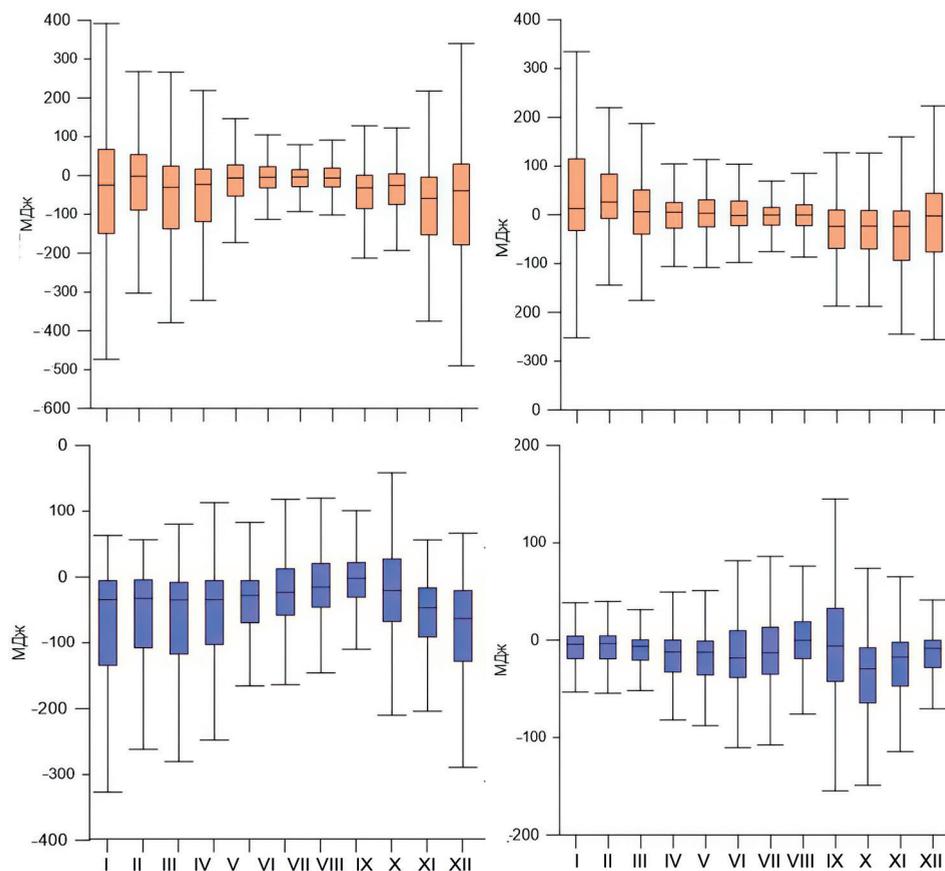


Рис. 3. Сезонный ход многолетней изменчивости потока H (наверху) и LE (внизу) на акватории Баренцева (слева) и Карского (справа) морей

Fig. 3. Seasonal changes in the long-term variability of the sensible (top) and latent heat fluxes of (bottom) in the Barents (left) and Kara (right) seas

время года в Баренцевом море невелика, что можно объяснить большей однородностью по пространству вертикального градиента температуры.

Рассмотрим многолетнюю изменчивость потоков (рис. 3). С течением времени потоки менялись довольно значительно для всех месяцев года, однако разница в изменчивости между теплым и холодным полугодиями довольно велика. Такая временная изменчивость объясняется тем, что акватория Баренцева моря расположена в зоне высокой циклонической активности, которая в наибольшей степени проявляется в холодное время года. В теплые годы с частыми и глубокими циклонами потоки турбулентного тепла наиболее велики, так как в тыловых зонах североатлантических циклонов возникают большие вертикальные градиенты температур и, следовательно, возрастают потоки тепла [1]. В наиболее холодные годы, когда большая часть моря покрывается ледяным покровом, потоки тепла небольшие. В Карском море ситуация иная. Здесь временная изменчивость потоков явного тепла невелика, поскольку в течение года над акваторией часто формируются и разрушаются температурные инверсии. Из-за доминирования в течение года туманной погоды невелика и изменчивость

потоков скрытого тепла. Многолетняя изменчивость турбулентных потоков в Карском море мало различается между месяцами, поскольку синоптическая обстановка над данным морем более однородна в течение года по сравнению с Баренцевым морем. Однако изменчивость потока явного тепла на порядок больше изменчивости потока скрытого тепла, так как море большую часть года покрыто льдом.

Для изучения многолетних изменений и процесса «атлантизации» были рассчитаны и построены многолетние изменения потоков явного и скрытого тепла для Баренцева и Карского морей (рис. 4). Данные графики отражают высокую временную изменчивость суммарных потоков за рассматриваемый период, особенно потока явного тепла (рис. 4а). В наибольшей степени она характерна для Баренцева моря, над которым от года в год синоптическая ситуация нестабильна. Над Карским морем многолетние изменения потоков в несколько раз меньше, что объясняется меньшими их значениями по сравнению с Баренцевым морем. С 1989 по 2000 г. наблюдался положительный тренд суммарного потока явного тепла для обоих морей с коэффициентом детерминации (квадрат коэффициента линейной корреляции) R^2 , равным 0,89 и 0,83 соответственно. Увеличению потока явного тепла из атмосферы к океану способствовал более быстрый рост температуры воздуха в течение данного десятилетия в приземном слое над океаном по сравнению с ростом температуры поверхности океана (ТПО) за данный период времени. Однако с 2000 по 2010 г. наблюдался отрицательный линейный тренд потока явного тепла с коэффициентом детерминации R^2 , равным 0,80 для Баренцева моря и 0,77 для Карского моря, вызванный паузой в глобальном потеплении. Причина данной паузы в работах [11, 12, 13, 14] объясняется активным накоплением тепла в данном десятилетии в глубинных частях океана, при этом рост температуры поверхности не наблюдался. Вследствие этого сократилась разница между температурой приповерхностного слоя воздуха и ТПО, суммарный поток явного тепла уменьшился. С 2014 по 2018 г. отдача тепла морской поверхностью вновь несколько уменьшается по сравнению с предыдущим десятилетием. Потеря тепла морями за счет испарения на протяжении всего периода демонстрирует заметные межгодовые колебания (рис. 4б), долгосрочные тренды невелики. Но, как и для потока явного тепла, можно отметить определенные колебания с периодом порядка 10 лет и уменьшение испарения в последнее десятилетие и в Баренцевом, и в Карском морях.

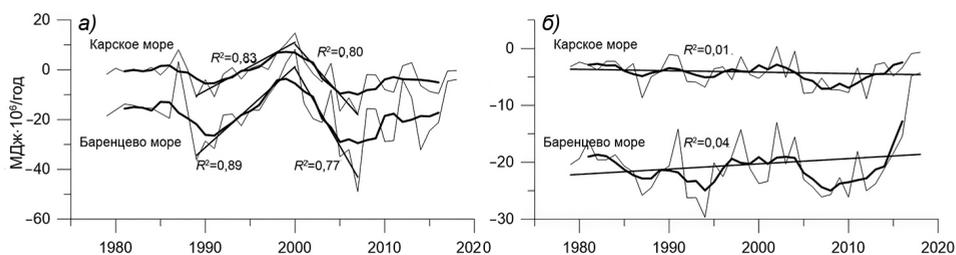


Рис. 4. Ежегодные изменения суммарного потока явного тепла (а) и потока скрытого тепла (б) над акваториями морей (тонкая линия), скользящая средняя (интервал сглаживания 5 лет), линии регрессии и соответствующий им коэффициент детерминации R^2 (прямые линии)

Fig. 4. Long-term changes in the total of sensible (а) and latent heat fluxes (б) over the seas (fine line), running average (window width 5 years), regression line and the corresponding coefficient of determination R^2 (straight line).

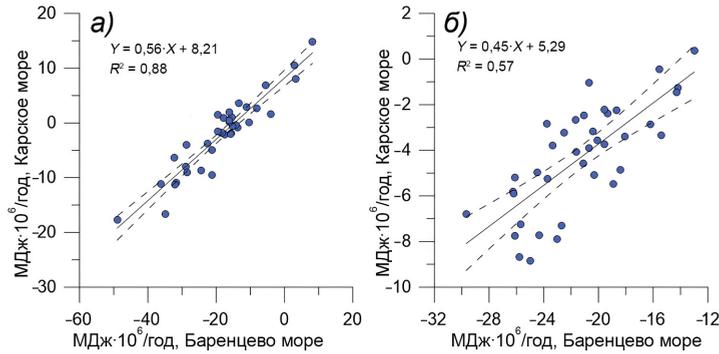


Рис. 5. Диаграмма рассеяния для годовых сумм интегральных по акватории Баренцева и Карского морей потока явного тепла (а) и потока скрытого тепла (б). Сплошной линией показана линейная аппроксимация, пунктир — 95 % доверительный интервал

Fig. 5. Scattering plot for the integral over the area of the Barents and Kara seas annual sum of heat (а) and sensible (б) fluxes. The solid line — the linear approximate, the dotted line — 95 % confidence interval

Показано, что многолетние изменения суммарных потоков тепла над Карским морем сравнительно невелики, они значительно менее выражены, чем над Баренцевым морем, тем не менее на графиках прослеживается связь в многолетнем ходе потоков явного и скрытого тепла между данными морями. Для статистической оценки этой связи была построена диаграмма рассеяния (рис. 5). Мы видим, что коэффициент детерминации R^2 линейной аппроксимации диаграммы рассеяния интегральных сумм потока явного тепла равен 0,88, потока скрытого тепла — 0,57, что отражает высокую связь изменчивости многолетних изменений их интегральных сумм между Баренцевым и Карским морями. Данная связь объясняется активной циклонической деятельностью в западном секторе Российской Арктики и доминированием воздушных потоков западного направления. Это свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов в этих морях, влияющих на энергообмен между морями и атмосферой.

Рассматриваемая территория в зимнее полугодие характеризуется большим горизонтальным контрастом атмосферного давления на уровне моря. Даже средняя многолетняя картина свидетельствует, что над Баренцевым морем, в особенности над его юго-западной частью, расположена область низкого давления, генетически связанная с атлантическими циклонами. К востоку давление растет и достигает максимума на юго-востоке. Сравнительно высокие значения давления в зимнее время здесь объясняются влиянием Сибирского антициклона, отроги которого зимой могут распространяться далеко на север и запад, достигая Карского моря. Весной Сибирский антициклон разрушается, и давление над восточной частью понижается, в то же время Исландский минимум ослабевает и усиливается влияние Азорского максимума, что сопровождается небольшим ростом давления над Баренцевым морем. В летнее время среднее поле давления над рассматриваемой территорией характеризуется относительной однородностью. Хотя ежедневная циклоническая деятельность приносит значительную изменчивость в характер погоды. Для выявления связи потоков тепла и атмосферного давления с синоптическими условиями над акваторией Баренцева и Карского морей были исследованы аномалии полей

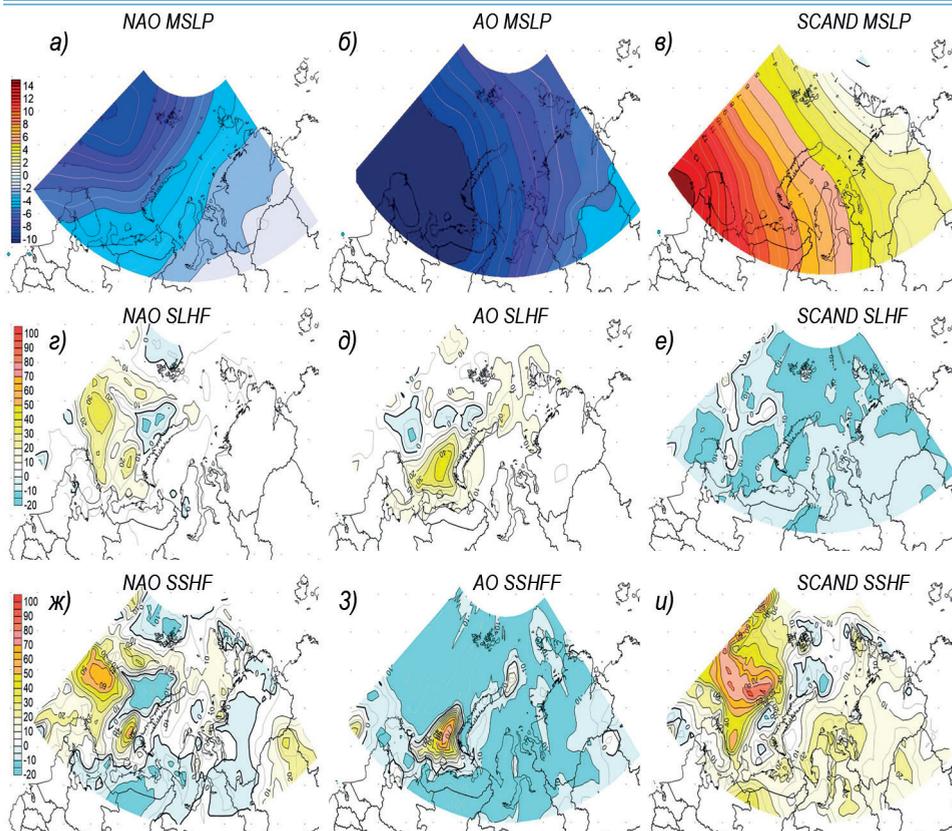


Рис. 6. Разность аномалий полей атмосферного давления и потоков тепла положительной и отрицательной фазы для февраля. Слева направо по фазам NAO, AO, SCAND. Сверху вниз — по полям LE, поток H

Fig. 6. Difference of anomalies of fields of atmospheric pressure and heat fluxes of positive and negative phases for February. From left to right by phases NAO, AO, SCAND. From top to bottom — by fields of pressure, LE, H

атмосферного давления и потоков тепла для положительной и отрицательной фазы индексов ОЦА. Рассмотрим композитные карты разности аномалий полей атмосферного давления и потоков тепла для положительной и отрицательной фаз всех трех индексов ОЦА в зимний период. На рис. 6 представлены разности их аномалий для февраля. Наибольшая отрицательная разность характерна для индексов NAO и АО (–8... –10 гПа) (рис. 6а, б). Это объясняется высокой контрастностью реакции поля давления на фазу циркуляционного индекса, а также близостью данного района к среднесезонному зимнему положению Исландского минимума, в связи с чем здесь чаще всего наблюдаются пониженные величины атмосферного давления и преобладают их отрицательные аномалии. Для индекса SCAND (рис. 6в) характерна иная ситуация. Поскольку SCAND характеризуется антициклонической циркуляцией над Скандинавией, то над юго-западными районами Баренцева моря наблюдается положительная, максимально большая разность фаз атмосферного давления, и она постепенно уменьшается при удалении от Скандинавского п-ова,

в связи с уменьшением повторяемости блокирующих антициклонов, формирующихся над Скандинавией и северо-западом России.

Рассмотрим разность аномалий полей турбулентных потоков тепла (рис. 6г–и). Как для потока H , так и для потока LE для всех трех индексов характерны следующие закономерности. Наибольшая положительная разность наблюдается над югом Баренцева моря в районе протекания Нордкапского и Мурманского течений, а также над побережьем о. Южный архипелага Новая Земля. При этом наибольшие аномалии характерны для потока H и достигают значений 90–100 для индекса SCAND (рис. 6и). Во всех остальных районах аномалии либо не выражены, либо крайне малы (0–10). Над Карским морем аномалии потоков тепла также практически не наблюдаются. Большие величины разности аномалий для всех трех индексов над южной частью Баренцева моря объясняются высокими показателями турбулентных потоков тепла над данным регионом и их наиболее высокой временной сезонной и синоптической изменчивостью здесь из-за активной циклонической деятельности зимой. Разность аномалий потока LE меньше таковой для потока H примерно в 2 раза, поскольку меньше абсолютные величины данного потока.

В летний период разности аномалий полей атмосферного давления и потоков тепла для положительной и отрицательной фаз всех трех индексов ОЦА незначительные. Это объясняется тем, что в данном сезоне абсолютные величины потоков тепла и их временная изменчивость существенно меньше, зимой. Кроме того, в летние месяцы траектории циклонов с Атлантики расположены немного севернее, и давление в их центрах повышается, в то же время Азорский антициклон усиливается, зона струйного течения смещается южнее, приток атлантического воздуха в район Баренцева моря ослабевает. Все это ведет к большей однородности полей атмосферного давления и потоков тепла летом по сравнению с зимой.

ВЫВОДЫ

1. Пространственная структура очагов максимальной и минимальной теплоотдачи над Баренцевым и Карским морями в последние десятилетия не претерпела существенных изменений по сравнению с серединой и второй половиной XX в.

2. Выявлены современные сезонные особенности пространственной изменчивости потоков H и LE , в частности, показано, что в пределах акватории Баренцева моря эта величина зимой в 5–10 и более раз может превышать летние значения, что обусловлено контрастностью температуры воды по пространству за счет теплых течений. Над Карским морем наибольшая неоднородность в поле потоков характерна для осеннего и начала зимнего сезонов.

3. Определено, что годовые суммы потоков тепла с поверхности Баренцева моря в среднем в 3–4 и в 5–6 раз, для потоков H и LE соответственно, превышают значения для Карского моря, а в отдельные годы могут различаться в десятки раз.

4. За период 1979–2018 гг. единый тренд интегральной по акватории годовой величины потоков H и LE статистически незначим. Тем не менее присутствуют направленные декадные изменения, в том числе наиболее явно выражены уменьшение потоков H на протяжении 1990-х гг., увеличение их в первом десятилетии XXI в. и вновь уменьшение в 2010-е гг., показано, что уменьшение турбулентных потоков происходит на фоне ослабления широтного переноса в атмосфере и увеличения площади морского льда.

5. Показано, что, несмотря на существенную разницу суммарных за год потоков тепла от поверхности Баренцева и Карского морей в атмосферу, межгодовые

изменения довольно хорошо синхронизированы, что свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов в этих морях, влияющих на турбулентный энергообмен между морями и атмосферой.

6. Наибольшие аномалии полей атмосферного давления зимой характерны для индексов NAO и АО, и в наибольшей степени они характерны для Баренцева моря. Наибольшие аномалии полей потоков тепла характерны для индексов NAO и SCAND, и их максимум локализован в районе Мурманского и Нордкапского течений. В летнее время аномалии полей всех величин выражены крайне слабо.

Конфликт интересов. Отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-60083).

Благодарности. Авторы признательны коллегам, выполняющим работы по этой тематике в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Competing interests. Authors have no competing interests.

Funding. This work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project 18-05-60083).

Acknowledgments. The authors are grateful for the support of colleagues working on this topic within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тилинина Н.Д.* Циклоническая активность Северного полушария и ее роль в формировании режимов взаимодействия океана и атмосферы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2016. 150 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиева и др. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 280 с.
3. *Калавиччи К.А., Башмачников И.Л.* К механизму положительной обратной связи долгосрочной изменчивости конвергенции океанических и атмосферных потоков тепла и площади ледяного покрова в Баренцевом море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 171–181.
4. *Сизов А.А., Михайлова Н.В., Баянкина Т.М.* Режимы крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана в Норвежском и Баренцевом морях // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 5. С. 615–618.
5. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A.* Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. 2017. V. 356. P. 285–291.
6. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balsameda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Baljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimbeger L., Heally S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597.

7. Zhou C., Wang K. Evaluation of surface fluxes in ERA-Interim using flux tower data // *Journal of Climate*. 2016. V. 29. P. 1573–1582.
8. Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic // *Journal of Climate*. 2014. V. 27. P. 2588–2606.
9. Benjamini Y. Opening the Box of a Boxplot // *The American Statistician journal*. 1988. V. 42. № 4. P. 257–262.
10. Ретина 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*. Сер. Вклад России в Международный полярный год 2007/08. М.; СПб.: Paulsen AARI, 2011. С. 236–250.
11. Changyu Li, Jianping Huang, Yongli He, Dongdong Li, Lei Ding. Atmospheric warming slowdown during 1998–2013 associated with increasing ocean heat content // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2019. V. 36. Is. 11. P. 1188–1202.
12. Chen X.Y., Tung K.K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration // *Science*. 2014. V. 345. № 6199. P. 897–903.
13. Josey S.A. Air-sea fluxes of heat, freshwater and momentum // *Operational Oceanography in the 21st Century* / A. Schiller and G. B. Brassington, Eds. Dordrecht: Springer, 2011. P. 155–184. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0332-2_6.
14. Аксенов П.В., Иванов В.В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64. № 1. С. 42–54.

REFERENCES

1. Tilinina N.D. *Tsiklonicheskaya aktivnost' severnogo polushariya i ee rol' v formirovanii rezhimov vzaimodeistviya okeana i atmosfery: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kand. fiz.-mat.nauk*. Cyclonic activity of the Northern Hemisphere and its role in the formation of modes of interaction between the ocean and the atmosphere: Dis. ... Cand. physical-mat. sciences. Moscow, 2016. 150 p. [In Russian].
2. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR*. Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas. T. 1. The Barents Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions. F.S. Terzieva (Eds). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 280 p. [In Russian].
3. Kalavichchi K.A., Bashmachnikov I.L. To the mechanism of positive feedback of long-term variability of the convergence of oceanic and atmospheric heat fluxes and the area of ice cover in the Barents Sea. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana*. *Izvestiya RAN. Physics of the atmosphere and ocean*. 2019, 55 (6): 171–181. [In Russian].
4. Sizov A.A., Mikhaylova N.V., Bayankina T.M. Regimes of large-scale interaction of the atmosphere and the ocean in the Norwegian and Barents seas. *Doklady Akademii Nauk*. *Proceed. Academy of Sciences*. 2019, 484 (5): 615–618. [In Russian].
5. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundford A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Science*. 2017, 356: 285–291.
6. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balsameda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Baljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimbeger L., Heally S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P, Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011, 137: 553–597.

7. Zhou C., Wang K. Evaluation of surface fluxes in ERA-Interim using flux tower data. *Journal of Climate*. 2016, 29: 1573–1582.
8. Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic. *J. Climate*. 2016, 27: 2588–2606.
9. Benjamini Y. Opening the Box of a Boxplot. *The American Statistician journal*. 1988, 42 (4): 257–262.
10. Repina I.A., Artamonov A.Yu., Smirnov A.S., Chechin D.G. Investigation of the interaction of the ocean and the atmosphere in polar regions within the framework of the international polar year. *Meteorological and Geophysical Research. Ser. Russia's contribution to the International Polar Year. 2007/08*. Moscow; St. Petersburg: Paulsen AARI, 2011: 236–250. [In Russian].
11. Changyu Li, Jianping Huang, Yongli He, Dongdong Li, Lei Ding. Atmospheric warming slowdown during 1998–2013 associated with increasing ocean heat content. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2019, 36 (11): 1188–1202.
12. Chen X.Y., Tung K.K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*. 2014, 345 (6199): 897–903.
13. Josey S.A. Air-sea fluxes of heat, freshwater and momentum. *Operational Oceanography in the 21st Century*. A. Schiller and G. B. Brassington, Eds. Dordrecht: Springer, 2011: 155–184. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0332-2_6.
14. Aksenov P.V., Ivanov V.V. “Atlantification” as a possible cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 42–54. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54>. [In Russian].