

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.583

Г.В. Суркова¹, В.А. Романенко²

СЕЗОННЫЕ И МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛА МЕЖДУ МОРЕМ И АТМОСФЕРОЙ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Исследован современный режим турбулентного теплообмена с атмосферой над Баренцевым и Карским морями, рассчитаны оценки его пространственной, сезонной и синоптической изменчивости (1979–2018) по показателям среднеквадратичного отклонения. Показано, что на протяжении последних десятилетий области расположения очагов максимального энергообмена между поверхностью Баренцева моря и атмосферой существенно не изменились по сравнению с серединой и второй половиной XX в. Выявлено, что наибольшая сезонная и синоптическая изменчивость потоков тепла характерна для центральной и западной частей Баренцева моря. Получено, что оба показателя изменчивости в холодное время года в два-пять и более раз выше, чем в теплое, а пространственная неоднородность показателей изменчивости зимой примерно в два раза больше, чем летом. Количественные оценки показали, что в пределах акватории Баренцева моря пространственная изменчивость потоков зимой в пять-десять и более раз может превышать летние значения. Над Карским морем наибольшая неоднородность в поле потоков характерна для осеннего и начала зимнего сезонов. Определено, что годовые суммы потоков явного и скрытого тепла с поверхности Баренцева моря в среднем в три-четыре и в пять-шесть раз, соответственно, превышают значения для Карского моря, а в отдельные годы могут различаться в десятки раз. За исследуемый период единый тренд интегральной по акватории годовой величины потоков явного и скрытого тепла не выражен, хотя присутствуют разнонаправленные декадные колебания. Показано, что, несмотря на существенную разницу термического режима Баренцева и Карского морей и нижней атмосферы над ними, межгодовые изменения суммарных турбулентных потоков довольно хорошо синхронизированы, что свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов, влияющих на энергообмен между морями и атмосферой.

Ключевые слова: Баренцево и Карское моря, теплообмен океана и атмосферы, тренды

Введение. Гидрометеорологический режим Арктики стремительно меняется в последние десятилетия. Так называемое «арктическое усиление» особенно заметно проявляется в положительных трендах температуры воздуха и воды арктических морей [Алексеев, 2015; Второй..., 2014; IPCC..., 2013; Доклад..., 2020; Voeke, Taylor, 2018; Serreze, Wang, 2011]. Турбулентный теплообмен между поверхностью морей и атмосферой, наряду с облачностью, радиационными потоками, тепловым и ледовым режимом морей, циркуляцией атмосферы и океана, представляет один из важных факторов, регулирующих температурный режим Арктики. Количественным оценкам потоков тепла и испарения в этом регионе посвящено много работ, основанных на экспедиционных измерениях, спутниковых данных, результатах пространственных реконструкций и моделирования [Атлас Арктики, 1985; Гидрометеорология и гидрохимия..., 1990; Лаппо и др., 1990; Репина и др., 2011; Репина, Артамонов, 2020; Ivanov et al., 2019]. Настоящая работа продолжает иссле-

дования в этой области. Оценка пространственно-временной изменчивости турбулентных потоков на масштабе десятилетий является важным вкладом в понимание механизмов взаимодействия океана и атмосферы.

Баренцево и Карское моря расположены в западном морском секторе Российской Арктики. И в атмосфере, и в океане гидрометеорологический режим испытывает активное влияние Атлантики, которое ослабевает с запада на восток. Для теплых атлантических вод, движущихся на восток, естественным препятствием становится архипелаг Новая Земля, в атмосфере же атлантический воздух может достигать восточных окраин Карского моря. Циклоническая деятельность в атмосфере в западном секторе российской Арктики выражена ярко, особенно в зимний период. В этой широтной зоне проходят траектории многих атлантических циклонов [Proshutinsky, Johnson, 1997; Rudeva, Gulev, 2007]. Наличие контрастной в пространстве температуры поверхности в Баренцевом море за счет присутствия

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: galina_surkova@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, студент; e-mail: romanenko.victor.geo@mail.ru

теплых течений и морского льда, а также холодного материка зимой усиливает бароклинность в атмосфере и способствует усилению циклогенеза, который может выражаться в различных синоптических ситуациях и даже при определенных условиях приобретает черты муссонной циркуляции [Kislov, Matveeva, 2020], что влияет на мощность и сплошность морского льда [Ding et al., 2017].

Типичные размеры внутритропических циклонов и антициклонов – 800–1000 км. В разных частях этих вихрей адвекция воздуха идет разнонаправленно, создавая определенные погодные условия и вертикальную стратификацию нижней атмосферы, определяя таким образом различную интенсивность турбулентных потоков в разных частях барических образований. Особенно мощная теплоотдача происходит при синоптических ситуациях, способствующих выносу холодного и сухого воздуха с суши на морскую поверхность, приводя к резкому увеличению вертикальных градиентов температуры и влажности. Это может происходить также и при выносе воздуха с морского льда на открытую воду [Тилинина и др., 2016; Селиванова и др., 2016]. Определенные синоптические ситуации приводят к формированию высоких скоростей ветра [Суркова, Крылов, 2016], что усиливает турбулентный теплообмен.

Изменение климата Арктики требует понимания вклада различных факторов обмена энергией между океаном и атмосферой в эти процессы. В настоящей работе представлены результаты оценок современной пространственной, синоптической, сезонной и многолетней изменчивости турбулентных потоков явного и скрытого тепла в западном секторе Российской Арктики, опирающиеся на современные данные реанализа, формирующегося на основе 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.

Материал и методы исследований. Исходным материалом для расчетов и оценки многолетней пространственно-временной изменчивости стали данные о потоках явного и скрытого тепла между морем и атмосферой по результатам реанализа ERA-Interim [Dee et al., 2011; ECMWF..., 2019] за 1979–2018 гг. для территории 65–83° с. ш., 20–110° в. д. с пространственным разрешением 0,125 × 0,125° по широте и долготе (итого 721 × 145 узлов сетки) 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 [Berrisford et al., 2011; Zhou, Wang, 2016]. Основным исходным фактором, определяющим величину турбулентных потоков, – радиационный баланс, от которого зависит температура поверхности и воздуха. Над морской поверхностью дополнительное влияние оказывает состояние моря (высота волн, период, длина). Эти факторы учитываются при

модельных расчетах для подготовки ERA-Interim с учетом усвоения данных спутниковых наблюдений [Berrisford et al., 2011].

Выполненные в работе [Lindsay et al., 2014] сравнительные оценки разных реанализов показали хорошее соответствие модельных результатов по турбулентным потокам тепла реанализа ERA-Interim с данными независимых наблюдений. В статье [Zhou, Wang, 2016] показано, что корреляция данных наблюдений за турбулентными потоками американской сети Ameriflux (более 80 станций) и результатов ERA-Interim составляет более 80%.

Оценка сезонной и синоптической временной изменчивости потоков, а также их пространственной неоднородности в пределах каждого моря, выполнялась по среднеквадратичному отклонению (СКО):

$$СКО = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

где x_i – i -й элемент выборки; n – объем выборки; \bar{x} – среднее арифметическое выборки.

Синоптическое (внутримесячное) СКО (СКО_{снп}) вычислялось по исходным данным (каждые 6 ч) в узлах сетки ежегодно для каждого месяца. Расчет сезонной изменчивости (СКО_{сез}) был выполнен по среднемесячным значениям потоков во все годы. Далее за весь период (1979–2016) рассчитывались средние многолетние значения каждого показателя.

Для акватории каждого моря оценивалась интегральная годовая сумма энергии обмена теплом с атмосферой. По площади моря выполнялось «взвешивание» суммируемых значений с учетом широты и связанного с этим изменения площади ячейки реанализа.

Для анализа пространственной изменчивости суммарных за месяц потоков тепла функция распределения была представлена в форме диаграммы размаха («ящик с усами»). Диаграмма показывает медиану, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значения 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:

$$X_1 = Q_1 - k(Q_3 - Q_1), \quad (2)$$

$$X_2 = Q_3 + k(Q_3 - Q_1), \quad (3)$$

где X_1 – нижняя граница «уса»; X_2 – верхняя граница «уса»; Q_1 – первый квартиль; Q_3 – третий квартиль; k – коэффициент, равный 1,5 [Benjamini, 1988].

Результаты исследований и их обсуждение. Обобщение многолетних рядов позволило оценить современные условия турбулентного теплообмена между морской поверхностью и атмосферой. Сравнение особенностей пространственного распределения потоков явного и скрытого тепла (рис. 1) с оцен-

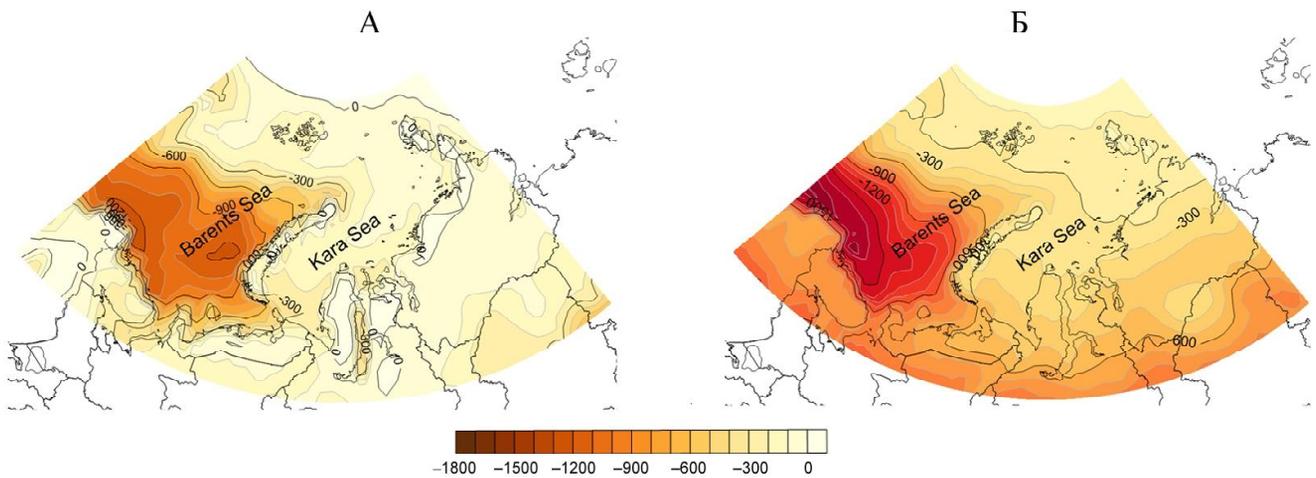


Рис. 1. Средняя годовая сумма потока явного тепла (А) и скрытого тепла (Б), МДж/м². Здесь и далее отрицательный знак перед величиной потока соответствует его направлению снизу-вверх, т. е. от поверхности моря в атмосферу

Fig.1. Average annual surface sensible heat flux SSHF (А) and surface latent heat flux SLHF (Б), MJ/m². Hereinafter, the negative sign in front of the flow value corresponds to its direction from bottom to top, i. e. from the sea surface to the atmosphere

ками, сделанными ранее [Гидрометеорология и гидрохимия..., 1990; Атлас Арктики..., 1985], показывает, что общие закономерности расположения очагов максимальной и минимальной теплоотдачи сохраняются. Но подробность данных реанализа позволила выявить и дополнительные пространственные детали, и особенности многолетних изменений. Максимальные затраты тепла на испарение и потоков явного тепла приходится на районы теплых течений, проникающих из Атлантики. Их влияние особенно ярко выражено в Баренцевом море, поскольку далее к востоку архипелаг Новая Земля препятствует движению теплых вод в Карское море, что делает принципиально несхожим режим теплообмена морей с атмосферой. Наличие теплых течений в Баренцевом море придает выраженную азональность в картине теплообмена и приводит к большой пространственной изменчивости потоков тепла в атмосферу. Над Карским морем, значительную часть года покрытым льдом, поле потоков тепла гораздо более однородно.

Ежемесячные многолетние оценки пространственной неоднородности потоков по акватории каждого из морей и ее годовой ход представлены на рис. 2. Из результатов видно, что в летний сезон поля наиболее сглажены. Особенности годового хода пространственной изменчивости для обоих морей во многом определяются площадью и сплоченностью морского льда, а для Баренцева моря еще и теплыми течениями. Особенно мощные потоки турбулентного тепла в атмосферу отмечаются в зимнее время, что подтверждается и данными наблюдения [Репина и др., 2014]. Поэтому в холодный сезон для этого моря картина довольно контрастна. А поскольку значительная часть моря свободна ото льда или же он представляет собой не сплошной покров, то сами значения потоков существенно больше, чем в Карском море. Для последнего наибольший разброс

значений в пределах акватории отмечается в свободный ото льда период (в конце лета), а также когда вновь постепенно начинается формирование ледового покрова. В целом за год для обоих морей теплоотдача направлена в атмосферу. Однако над Карским морем в декабре и январе поток, хоть и небольшой, бывает направлен вниз. Это может быть связано с ситуациями инверсионного распределения температуры воздуха в приземном слое над льдом в условиях полярной ночи. Над Баренцевым морем (см. рис. 2) такая направленность потоков тоже возможна, особенно в северной части, но преобладает мощная теплоотдача из моря в атмосферу. Величина потоков явного и скрытого тепла над Карским морем большую часть года близка к нулю, заметной она становится в сентябре–ноябре, но и тогда средние значения редко превышают 40 МДж/мес по суммарной площади одной ячейки пространственной сетки реанализа. Расчеты показали, что суммарные годовые потоки явного тепла со всей акватории Баренцева моря в среднем выше, чем над Карским морем в три-четыре раза, хотя в отдельные годы превышают их и в десятки раз. Поступление тепла в атмосферу за год с поверхности Баренцева моря в пять-шесть раз больше, чем с Карского моря, в некоторые годы величина интегральных потоков может отличаться на порядок.

Оценка внутрigoдовой (сезонной) и внутримесячной (синоптической) изменчивости показала, что наибольшие их значения характерны для центральной и западной частей Баренцева моря и зоны шельфа. В перечисленных районах более ярко выражены процессы, влияющие на изменчивость турбулентных потоков: прогрев и выхолаживание, стгонно-нагонные явления, интенсивная динамика, вызванная взаимодействием холодных арктических и теплых атлантических вод.

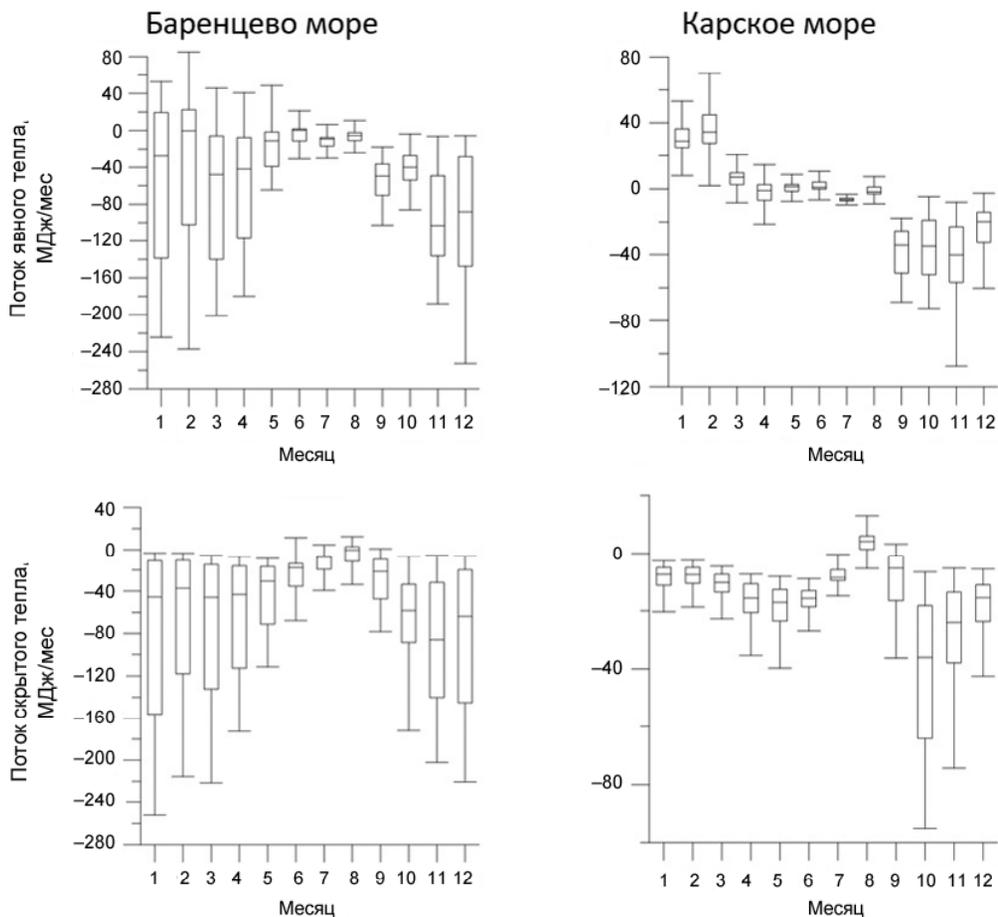


Рис. 2. Сезонные изменения пространственной изменчивости потока явного тепла (наверху) и скрытого тепла (внизу) на акватории Баренцева (слева) и Карского (справа) морей

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

Согласно выполненным расчетам наибольшее $СКО_{сез}$ потока явного тепла (свыше 80 Вт/м^2) наблюдается у северных побережий Скандинавского и Кольского полуостровов, недалеко от о. Южный арх. Новой Земли и в шельфовых районах моря. Значительно меньше $СКО_{сез}$ потока явного тепла в более холодных регионах ($40\text{--}50 \text{ Вт/м}^2$), в частности на севере Баренцева моря, на всей территории Карского моря, включая пролив Карские Ворота и Югорский Шар на юге, а также на всем побережье морей. Минимальные значения $СКО_{сез}$ ($30\text{--}40 \text{ Вт/м}^2$) прослеживаются на территориях, круглый год покрытых снегом и льдом: на ледниках Новой Земли и Полярного Урала.

Наибольшие значения $СКО_{сез}$ потока скрытого тепла в Баренцевом море получены для территории Баренцева моря примерно до 75° с. ш. (свыше 60 Вт/м^2). На крайнем севере Баренцева моря, в частности возле Земли Франца-Иосифа, в северной части Карского моря $СКО_{сез}$ скрытого тепла выражено менее всего (около 35 Вт/м^2).

Расчеты по многолетнему ряду синоптической (внутримесячной) изменчивости для каждого месяца показали, что наибольших значений она до-

стигает в декабре–марте. Для потока явного тепла $СКО_{сиз}$ в этот период на большей части Баренцева моря (к югу от 75° с. ш.) превышает 100 Вт/м^2 , скрытого тепла $25\text{--}50 \text{ Вт/м}^2$. Над Карским морем в холодный сезон $СКО_{сиз}$ в 5–10 и более раз меньше, чем над Баренцевым морем, и величина ее довольно однородна в пространстве. Такие контрасты можно объяснить влиянием активной в зимний период циклонической деятельности на полярном и арктическом атмосферных фронтах, приводящей к меридиональной адвекции воздушных масс, имеющих различную температуру. Их смена определяется синоптическими периодами, продолжительность которых в среднем составляет 5–10 сут. В то же время температура поверхности моря меняется медленнее. Такое сочетание «быстрых» процессов в атмосфере и «медленных» в море приводит к заметной временной изменчивости потоков. Над Карским морем, покрытым льдом, значения потоков малы сами по себе, отсюда мала и их изменчивость.

В июне–августе $СКО_{сиз}$ потока явного тепла имеет наименьшие значения, $30\text{--}50 \text{ Вт/м}^2$. Пространственные контрасты выражены очень слабо – изменчивость уменьшается с юга на север, несколь-

ко возрастая в районе Норвежского течения и в прибрежных районах морей. Эти же черты присущи СКО потока скрытого тепла, значения составляют $15\text{--}25 \text{ Вт/м}^2$.

Сопоставление полученных результатов показывает, что временная изменчивость потоков явного тепла на сезонном и синоптическом временных масштабах в два-три раза больше, чем потоков скрытого тепла.

Рассмотрим годовые суммы турбулентных потоков, поступающих в целом с акватории морей в атмосферу (рис. 3). В многолетних изменениях теплоотдачи с поверхности моря за счет потока явного тепла (см. рис. 3А) общий тренд за 1979–2018 гг. выражен слабо. Но в отдельные периоды продолжительные направленные изменения происходили как в сторону уменьшения потерь тепла поверхностью моря (1990–2000), так и в сторону их увеличения (2000–2009) (см. рис. 3А). Это особенно заметно для потоков явного тепла, но проявляется и в потоках скрытого тепла. В последнее десятилетие отдача тепла морской поверхностью вновь несколько уменьшается по сравнению с предыдущим, особенно с 2014 по 2018 г.

Потеря тепла морями за счет испарения на протяжении всего периода характеризуется заметны-

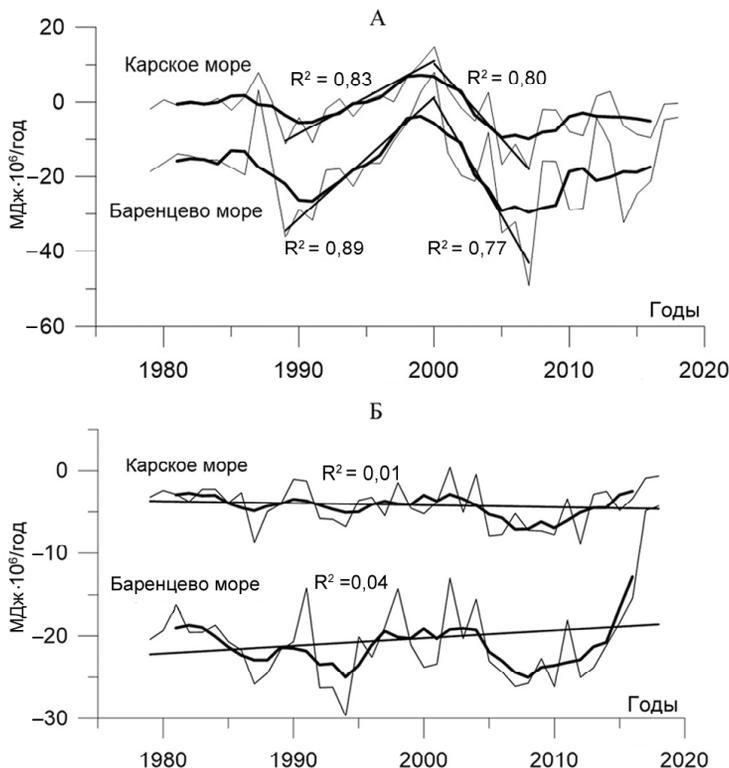


Рис. 3. Ежегодные изменения суммарного потока явного тепла (А) и потока скрытого тепла (Б) над акваториями морей (тонкая линия), скользящая средняя (интервал сглаживания – 5 лет), линии регрессии и соответствующий им коэффициент детерминации R^2 (прямые линии)

Fig. 3. Long-term changes in the total sensible heat flux (A) and the latent heat flux (B) over water areas of the seas (fine line), running average (with 5-year window width), regression lines and corresponding coefficient of determination R^2 (straight lines)

ми межгодовыми колебаниями (см. рис. 3Б), долгосрочные тренды невелики. Но, как и для потоков явного тепла, можно отметить определенные колебания с периодом порядка 10 лет и заметное уменьшение испарения в последнее десятилетие и в Баренцевом, и в Карском море.

При сопоставлении полученных нами результатов с известными данными по изменению площади морского льда в Баренцевом море по данным спутниковых измерений [Заболотских, Мясоедов, 2017; Wang et al., 2019] четкой синхронизации потоков тепла и сплоченности морского льда не обнаружено. Тем не менее сонаправленность процессов во времени присутствует. В середине 1990-х и конце первой декады 2000-х гг. отмечались годы, когда площадь льдов возрастала. В эти десятилетия отмечалось и уменьшение турбулентных потоков. Ускорение снижения ледовитости Баренцева моря отмечается в разных источниках с начала 2000-х гг., например [Wang et al., 2019; NOAA, 2020], что могло способствовать активизации теплообмена в это десятилетие.

Изменение интенсивности потоков может быть вызвано изменением атмосферной циркуляции и положения арктического и полярного фронтов. Оценки арктического индекса атмосферной циркуляции, индекса северо-атлантического колебания и скандинавского индекса циркуляции [NOAA..., 2020] показывают, что в 1990-е гг. происходило ослабление широтного и активизация меридиональных процессов, в 2000-е гг. широтный перенос усиливается, меридиональный ослабевает, а в 2010-е гг. вновь происходит усиление меридиональных процессов.

Температура воздуха над основной частью Баренцева и Карского морей в 1990-е гг. несколько снизилась, в конце 1990-х гг. вновь вернулись тенденции на повышение, которые продолжают в настоящее время. Средняя годовая температура атлантических водных масс в слое 50–700 м, поступающих в Баренцево море на протяжении 1980–2012 гг., по данным наблюдений, повысилась на $1,5^\circ\text{C}$ [Muilwijk et al., 2018; Korabely et al., 2014]. На протяжении 1990-х гг., когда интенсивность теплообмена уменьшалась, можно отметить положительные аномалии температуры, ее резкое уменьшение к концу десятилетия и с 1998 г. усиление роста.

Важными факторами, влияющими на тепловой баланс поверхности и теплообмен, являются облачность и инсоляция подстилающей поверхности. Но в данной работе они не рассматриваются.

Связность во времени годовых сумм потоков явного и скрытого тепла над Баренцевым и Карским морями отражена на диаграммах рассеяния (рис. 4). Видно, что временная корреляция между морями велика для потоков одного вида, при этом заметно бóльшая синхронность свойственна теплоотдаче за счет турбулентных потоков явного тепла.

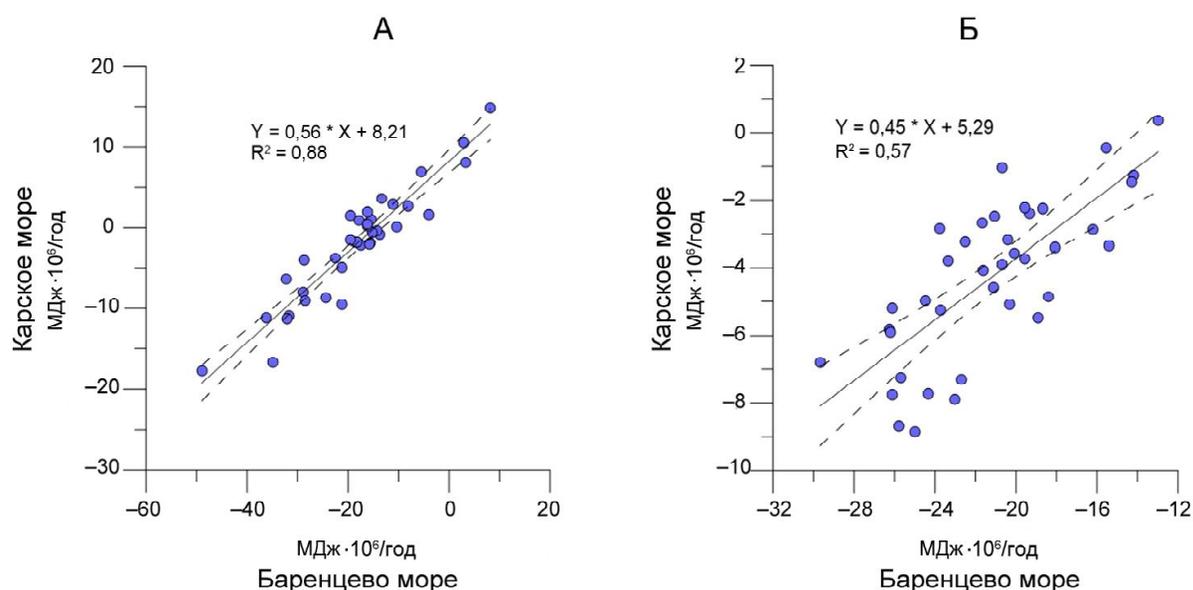


Рис. 4. Диаграмма рассеяния для годовых сумм интегральных по акватории Баренцева и Карского морей потока явного тепла (А) и потока скрытого тепла (Б). Сплошной линией показана линейная аппроксимация, пунктир – 95% доверительный интервал

Fig. 4. Scattering diagram for annual sums of sensible heat flux (A) and latent heat flux (Б) integrated over the Barents and Kara Seas. The solid line shows the linear approximation, the dotted line shows the 95% confidence interval

В то же время изменение потоков явного и скрытого тепла над одним морем не всегда происходит синхронно, коэффициенты корреляции временных рядов не превышают 0,1.

Расчеты показали, что суммарные годовые потоки явного тепла со всей акватории Баренцева моря в среднем за исследуемый период больше, чем над Карским морем в три-четыре раза, а в отдельные годы превышают их в десятки раз. Поступление скрытого тепла в атмосферу за год с поверхности Баренцева моря в пять-шесть раз больше, чем с Карского моря, в некоторые годы величина интегральных потоков может отличаться на порядок.

Выводы:

- 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.;

- выявлены современные сезонные особенности пространственной изменчивости потоков явного и скрытого тепла, в частности, показано, что в пределах акватории Баренцева моря эта величина зимой в пять–десять и более раз может превышать летние значения, что обусловлено контрастностью температуры воды по пространству за счет теплых течений. Над Карским морем наибольшая неодно-

родность в поле потоков характерна для осеннего и начала зимнего сезонов;

- определено, что годовые суммы потоков явного и скрытого тепла с поверхности Баренцева моря в среднем в три-четыре и в пять-шесть раз, соответственно, превышают значения для Карского моря, а в отдельные годы могут различаться в десятки раз;

- за 1979–2018 гг. единый тренд интегральной по акватории годовой величины потоков явного и скрытого тепла статистически незначим. Тем не менее присутствуют направленные декадные изменения, в том числе наиболее явно выражены уменьшение потоков явного тепла 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;

- 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.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60083), Госзадания (номер ЦИТИС: АААА-А16-116032810086-4), а также при поддержке Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ «Будущее планеты и развитие окружающей среды». Благодарим Крылова А.А. за помощь в подготовке исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11–26.
- Атлас Арктики / под ред. А.Ф. Трешникова. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР, 1985. 204 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
- 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.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М., 2020. 97 с.
- Заболотских Е.В., Мясоедов А.Г. Пространственно-временная изменчивость морского льда в Баренцевом море по данным измерений спутниковых микроволновых радиометров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 5. С. 195–208.
- Ланно С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе «океан–атмосфера» и энергоактивные области Мирового океана. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 336 с.
- Репина И.А., Артамонов А.Ю. Турбулентный теплообмен атмосферы и подстилающей поверхности в прибрежной зоне Антарктики по данным инструментальных наблюдений // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 2. С. 45–52.
- 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. Серия «Вклад России в Международный полярный год 2007/08»*, М.; СПб.: Paulsen AARI, 2011. С. 236–250.
- Селиванова Ю.В., Тилинина Н.Д., Гулев С.К., Добролюбов С.А. Влияние ледового покрова в Арктике на турбулентные потоки тепла между океаном и атмосферой // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 18–22.
- Суркова Г.В., Крылов А.А. Синоптические ситуации, способствующие формированию экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом море // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2016. № 6. С. 18–25.
- Тилинина Н.Д., Гулев С.К., Гавриков А.В. Формирование экстремально высоких турбулентных потоков тепла из океана в атмосферу в Северной Атлантике // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 5–9.
- Berrisford P., Dee D., Poli P., Brugge R., Fielding K., Fuentes M., Kallberg P., Kobayashi S., Uppala S., Simmons A. The Era-Interim archive. Version 2.0, ERA Rep. Ser. no. 1 (Tech. Rep.), European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF), UK, Reading, 2011, 27 p.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Kobayashi P., Andrae S.U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy 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, vol. 137, p. 553–597.
- Ding Q., Schweiger A., L'Heureux M., Battisti D.S., Po-Chedley S., Johnson N.C., Blanchard-Wrigglesworth E., Harnos K., Zhang Q., Eastman R., Steig E.J. Influence of high – latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice, *Nature Climate Change*, 2017, no. 7(4), p. 289–295.
- IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Ivanov V.V., Varentsov M.I., Matveeva T.A., Repina I.A., 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, Molecular Diversity Preservation International (Switzerland)*, 2019, vol. 10, no. 4, p. 184.
- Kislov A., Matveeva T. The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2020, vol. 10, p. 339–356.
- Korablev A., Smirnov A., Baranova O. Climatological Atlas of the Nordic Seas and Northern North Atlantic, D. Seidov, A.R. Parsons (eds.), NOAA Atlas NESDIS 77, 2014, 122 p., dataset, DOI: 10.7289/V54B2Z78.
- Lindsay R., Madsen M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of Seven Different Atmospheric Reanalysis Products in the Arctic, *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, p. 2588–2606.
- Muylwijk M., Smedsrud L.H., Ilicak M., Drange H. Atlantic Water heat transport variability in the 20th century Arctic Ocean from a global ocean model and observations, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, vol. 123, p. 8159–8179, DOI: 10.1029/2018JC014327.
- Proshutinsky A., Johnson M. Two circulation regimes of the wind driven Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 1997, vol. 102, p. 12493–12512.
- Rudeva I., Gulev S.K. Climatology of cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle, *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society (United States), 2007, vol. 135, p. 2568–2587.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global Planet Change*, 2011, vol. 77, p. 85–96.
- Wang Y., Bi H., Huang H., Liu Yanxia, Liu Yilin, Xi L., Fu M., Zhang Z. Satellite-observed trends in the Arctic sea ice concentration for the period 1979–2016, *Journal Ocean. Limnol.*, 2019, vol. 37, p. 18–37, DOI: 10.1007/s00343-019-7284-0.
- Zhou C., Wang K. Evaluation of Surface Fluxes in ERA-Interim Using Flux Tower Data, *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, p. 1573–1582.
- Электронные ресурсы*
- Boeke R.C., Taylor P.C. Seasonal energy exchange in sea ice retreat regions contributes to differences in projected Arctic warming, *Nat. Commun.*, 2018, vol. 9, p. 5017, URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07061-9> (дата обращения 22.11.2019).
- ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды), реанализ ERA-Interim. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (дата обращения 22.11.2019).
- NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США). URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc> (дата обращения 15.11.2020).

Поступила в редакцию 14.10.2020

После доработки 11.12.2020

Принята к публикации 21.01.2021

G.V. Surkova¹, V.A. Romanenko²

SEASONAL AND LONG-TERM CHANGES OF TURBULENT HEAT FLUXES BETWEEN SEA AND ATMOSPHERE IN WESTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

The current regime of turbulent heat exchange with the atmosphere over the Barents and Kara Seas was investigated, and its spatial, seasonal and temporal variability during 1979–2018 was estimated by the root-mean-square deviation values. It is shown that in recent decades the localization of the centers of maximum energy exchange between the sea surface and the atmosphere was practically the same as in the middle and second half of the 20th century. The highest seasonal and synoptic variability of heat fluxes is typical for the central and western parts of the Barents Sea. In the cold season both indicators of variability are 2–5 and more times higher than in the warm season, and the spatial heterogeneity of variability indicators in winter is about twice that in summer. Quantitative estimates have shown that winter spatial variability of fluxes within the Barents Sea may exceed summer values 5 to 10 times or more. The most pronounced heterogeneity of fluxes field over the Kara Sea is typical for autumn and early winter seasons.

Calculated annual amounts of sensible and latent heat fluxes from the surface of the Barents Sea exceed the values for the Kara Sea by an average of 3–4 and 5–6 times, respectively; and in some years they may differ by tens of times. For the period under study no single trend of the annual magnitude of integral sensible and latent heat fluxes over the water area was recorded, although there are multi-years decadal fluctuations. It is shown that, despite the significant difference in thermal regime of the Barents and Kara seas and lower atmosphere above them, the inter-annual changes in the total turbulent flows are quite well synchronized. This indicates the common character of large-scale hydrometeorological processes, influencing the energy exchange between the seas and the atmosphere.

Key words: Barents and Kara seas, ocean – atmosphere heat transfer, trends

Acknowledgements. This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60083), State Assignment (CITIS number: AAAA-A16-116032810086-4), and the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow State University "The Future of the Planet and the Development of the Environment". We thank A.A. Krylov for assistance in preparing the initial data.

REFERENCES

- Alekseev G.V.* Projavlenie i usilenie global'nogo poteplenija v Arktike [Manifestation and intensification of global warming in the Arctic], *Fundamental and applied climatology*, 2015, no. 1, p. 11–26. (In Russian)
- Atlas Arktiki* [Atlas of the Arctic], A.F. Treshnikov (ed.), Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, 1985, 204 p. (In Russian)
- Berrisford P., Dee D., Poli P., Brugge R., Fielding K., Fuentes M., Kallberg P., Kobayashi S., Uppala S., Simmons A.* *The Era-Interim archive. Version 2.0*, ERA Rep. Ser. no. 1 (Tech. Rep.), European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF), UK, Reading, 2011, 27 p.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Kobayashi P., Andrae S.U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hölm E.V., Isaksen L., Källberg 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, vol. 137, p. 553–597.
- Ding Q., Schweiger A., L'Heureux M., Battisti D.S., Po-Chedley S., Johnson N.C., Blanchard-Wrigglesworth E., Harnos K., Zhang Q., Eastman R., Steig E.J.* Influence of high – latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice, *Nature Climate Change*, 2017, no. 7(4), p. 289–295.
- Doklad ob osobennostjakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2019 god* [Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2019], Moscow, 2020, 97 p. (In Russian)
- Gidrometeorologija i gidrohimiya morej SSSR*, t. 1, Barentsevo more, vyp. 1, Gidro-meteorologicheskie uslovija [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR, vol. 1, The Barents Sea, iss. 1, Hydro-meteorological conditions], F.S. Terziev (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 280 p. (In Russian)
- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Ivanov V.V., Varentsov M.I., Matveeva T.A., Repina I.A., 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, Molecular Diversity Preservation International* (Switzerland), 2019, vol. 10, no. 4, p. 184.
- Kislov A., Matveeva T.* The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2020, vol. 10, p. 339–356.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: galina_surkova@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, student; e-mail: romanenko.victor.geo@mail.ru

- Korablev A., Smirnov A., Baranova O. *Climatological Atlas of the Nordic Seas and Northern North Atlantic*, D. Seidov, A.R. Parsons (eds.), NOAA Atlas NESDIS 77, 2014, 122 p., dataset, DOI: 10.7289/V54B2Z78.
- Lappo S.S., Gulev S.K., Rozhdestvenskij A.E. *Krupnomasshtabnoe teplovoe vzaimodejstvie v sisteme okean-atmosfera i energoaktivnye oblasti Mirovogo okeana* [Large-scale thermal interaction in the ocean – atmosphere system and the energy-active regions of the World Ocean], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 336 p. (In Russian)
- Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of Seven Different Atmospheric Reanalysis Products in the Arctic, *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, p. 2588–2606.
- Muilwijk M., Smedsrud L.H., Ilicak M., Drange H. Atlantic Water heat transport variability in the 20th century Arctic Ocean from a global ocean model and observations, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, vol. 123, p. 8159–8179, DOI: 10.1029/2018JC014327.
- Proshutinsky A., Johnson M. Two circulation regimes of the wind driven Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 1997, vol. 102, p. 12493–12512.
- Repina I.A., Artamonov A.Ju. Turbulentnyj teploobmen atmosfery i podstilajushhej poverhnosti v pribrezhnoj zone Antarktiki po dannym instrumental'nyh nabljudenij [Turbulent heat exchange of the atmosphere and underlying surface in the coastal zone of Antarctica according to instrumental observations], *Meteorology and Hydrology*, 2020, no. 2, p. 45–52. (In Russian)
- Repina I.A., Artamonov A.Ju., Smirnov A.S., Chechin D.G. [Study of the interaction of the ocean and the atmosphere in the polar regions within the framework of the international polar year 2007/08], *Meteorologicheskie i geofizicheskie issledovaniya* [Meteorological and geophysical researches], Moscow, St. Petersburg, Paulsen AARI Publ., 2011, p. 236–250. (In Russian)
- Rudeva I., Gulev S.K. Climatology of cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle, *Monthly Weather Review. American Meteorological Society (United States)*, 2007, vol. 135, p. 2568–2587.
- Selivanova Ju.V., Tilinina N.D., Gulev S.K., Dobroljubov S.A. Impact of Ice Cover in the Arctic on Ocean – Atmosphere Turbulent Heat Fluxes, *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 1, p. 14–18.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global Planet Change*, 2011, vol. 77, p. 85–96.
- Surkova G.V., Krylov A.A. Sinopticheskie situacii, sposobstvujushhie formirovaniju jekstremal'nyh znachenij skorosti vetra v Barencevom more [Synoptic situations contributing to the formation of extreme wind speed values in the Barents Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 6, p. 18–25. (In Russian)
- Tilinina N.D., Gulev S.K., Gavrikov A.V. Formation of Extreme Surface Turbulent Heat Fluxes from the Ocean to the Atmosphere in the North Atlantic, *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 1, p. 1–5.
- Vtoroj ocenocnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation], Moscow, Roshydromet Publ., 2014, 1008 p. (In Russian)
- Wang Y., Bi H., Huang H., Liu Yanxia, Liu Yilin, Xi L., Fu M., Zhang Z. Satellite-observed trends in the Arctic sea ice concentration for the period 1979–2016, *Journal Ocean. Limnol.*, 2019, vol. 37, p. 18–37, DOI: 10.1007/s00343-019-7284-0.
- Zabolotskih E.V., Mjasoedov A.G. Prostranstvenno-vremennaja izmenchivost' morskogo l'da v Barencevom more po dannym izmerenij sputnikovyh mikrovolnovyh radiometrov [Spatial and temporal variability of the Barents Sea ice retrieved from satellite passive microwave radiometer data], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 5, p. 195–208. (In Russian)
- Zhou C., Wang K. Evaluation of Surface Fluxes in ERA-Interim Using Flux Tower Data, *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, p. 1573–1582.
- Web sources*
- Boeke R.C., Taylor P.C. Seasonal energy exchange in sea ice retreat regions contributes to differences in projected Arctic warming, *Nat Commun.*, 2018, vol. 9, 5017, DOI: 10.1038/s41467-018-07061-9 (access date 22.11.2019).
- ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), ERA-Interim Reanalysis, URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (access date 22.11.2019).
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc> (access date 15.11.2020).

Received 14.10.2020

Revised 11.12.2020

Accepted 21.01.2021