

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.583

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПОВЕРХНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ  
В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

А.А. Сумкина<sup>1</sup>, В.В. Иванов<sup>2</sup>, К.К. Кивва<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Департамент водных биоресурсов и среды их обитания, отдел динамики климата и водных экосистем*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии*

<sup>1</sup> *Ст. специалист; e-mail: sumkinaaleksa@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Глав. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru*

<sup>3</sup> *Директор департамента, канд. геогр. наук; e-mail: kirill.kivva@gmail.com*

Исследована изменчивость суммарного теплового баланса (ТБ) Баренцева моря за холодный период года. Под холодным периодом подразумевается период выхолаживания поверхности моря (период, когда поток тепла устойчиво направлен в атмосферу). Оценивался вклад двух значимых составляющих теплового баланса (потоков явного и скрытого тепла) в наблюдающееся увеличение теплоотдачи на границе море – атмосфера за холодный период. Были использованы данные о потоках коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла из атмосферного реанализа Европейского центра по среднесрочному прогнозированию погоды ERA5. ТБ поверхности моря рассчитывался как сумма потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла. Суммарный тепловой баланс, а также суммарные потоки явного и скрытого тепла за холодный период рассчитывались посредством суммирования значений между датами начала и окончания периода охлаждения. Результаты выполненных расчетов показали увеличение суммарного ТБ за холодный период года в северной части моря (до 2000 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет) и уменьшение в южной части моря (до 1000 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет). В северной части моря доля потоков явного и скрытого тепла снижается до 0,3–0,4. Наблюдаемый тренд ТБ и его турбулентных составляющих с высокой степенью вероятности объясняются возрастанием разности между температурой воздуха и температурой поверхности моря.

**Ключевые слова:** потоки явного и скрытого тепла, температура поверхности моря, температура воздуха, Арктика

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.10

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море – часть Северо-Европейского бассейна Северного Ледовитого океана, расположенное в западной части евразийского шельфа, характеризуется более теплым климатом по сравнению с другими арктическими морями, что обусловлено адвекцией тепла течениями и особенностями теплообмена с атмосферой [Калавиччи, Башмачников, 2019]. В последние десятилетия в Баренцевом море (БМ) наблюдаются значительные климатические изменения [Иванов и др., 2022; Smedsrud et al., 2013]. Тепловой баланс поверхности моря показывает, какое количество тепла было отдано или получено морем в результате взаимодействия с атмосферой [Гидрометеорология..., 1990; Тепловой баланс..., 1956]. Процесс теплообмена на поверх-

ности моря влияет на многие физические процессы в океане и атмосфере. Например, резкие колебания теплообмена между океаном и атмосферой в период охлаждения способны влиять на формирование опасных гидрометеорологических явлений, в частности на развитие полярных циклонов [Заболотских и др., 2015]. От суммарной теплоотдачи с поверхности моря в атмосферу в холодный период года зависит глубина проникновения конвекции, которая определяет особенности структуры вод и может влиять на «цветение» фитопланктона в весенний период [Кивва и др., 2020; Трофимов и др., 2018]. Ранее было показано, что на севере, северо-востоке и востоке БМ наблюдается статистически значимый отрицательный линейный тренд суммарного теплового баланса (ТБ) поверхности моря за холодный

период года порядка – 1000 (Дж/м<sup>2</sup>)/40 лет [Сумкина и др., 2022б]. То есть в этих районах в последние годы поверхность моря теряет гораздо больше тепла во время холодного периода, чем в более ранние годы. Однако причины такой закономерности требуют дополнительных исследований.

В арктических морях в связи с относительно малыми значениями радиационного баланса, особенно в период охлаждения, когда коротковолновая радиация отсутствует, турбулентный обмен между поверхностью и атмосферой играет ведущую роль в ТБ поверхности. В БМ в среднем за год более 60% теплоотдачи в атмосферу обеспечивается потоками явного и скрытого тепла [Сизов и др., 2019].

Прямых наблюдений за радиационным и турбулентным теплообменом на границе море – атмосфера для БМ немного. Инструментальные наблюдения выполняются эпизодически во время экспедиций, а регулярные измерения проводятся только в прибрежных зонах на нескольких метеостанциях [Суркова, Романенко, 2021а]. Один из немногочисленных примеров прямых наблюдений за потоками тепла в БМ в недавние годы – исследование атмосферных процессов над акваториями морей российской Арктики в рамках международного проекта NABOS (Nansen and Amundsen Basin Observation System), описанное в работе [Варенцов и др., 2016]. Использовались данные составляющих радиационного баланса, потоков тепла, влаги и импульса из экспедиций НЭС «Академик Федоров» (2013) и НЭС «Академик Трешников» (2015). Результаты показали, что турбулентные потоки тепла были значительно больше в 2015 г., чем в 2013 г. Приповерхностный слой воды в 2015 г. был в среднем на 1°C теплее, чем в 2013 г., что авторы объяснили большей продолжительностью безледного периода, благодаря чему в верхнем слое оказалось аккумулировано больше тепла. Таким образом, в БМ наблюдается значительная межгодовая изменчивость составляющих турбулентного теплообмена на границе море – атмосфера.

Поскольку количественно оценить величины потоков явного и скрытого тепла по данным прямых измерений в БМ затруднительно, ценным источником информации об изменчивости составляющих ТБ служат реанализы, в которых эти параметры оцениваются с использованием методов ассимиляции данных наблюдений (включая спутниковые) и численного моделирования. Например, в исследовании [Суркова, Романенко, 2020] выявлено, что в целом за год над всей акваторией Баренцева моря поток явного тепла направлен в атмосферу, достигает максимума у берегов Скандинавского и Кольского полуостровов, а также у берегов о. Южный архипелага Новая Земля. Это связано с тем, что через дан-

ные акватории проходит продолжение Северо-Атлантического течения (Норвежское, Нордкапское, Мурманское и другие теплые течения), и различия между температурой поверхности океана и приводного слоя атмосферы наибольшие. Наименьший поток явного тепла наблюдается над северными, покрытыми льдом районами моря. Среднегодовой поток скрытого тепла над морем также наибольший над южной, юго-западной и юго-восточной частями Баренцева моря, там, где проходит теплое течение и где большую часть года ледяной покров отсутствует [Суркова, Романенко, 2021б]. На юге поток скрытого тепла достигает 40 Вт/м<sup>2</sup> за счет частых фазовых переходов, вызванных испарением воды и таянием льдов, приносимых из Карского моря через пролив Карские ворота. Над самым севером Баренцева моря, в особенности в районе архипелага Земля Франца-Иосифа, поток скрытого тепла имеет низкие значения, близкие к нулю (до 10 Вт/м<sup>2</sup>), так как там даже в летний (теплый) период температура воздуха отрицательная, а испарение с поверхности моря – незначительно [Суркова, Романенко, 2021б].

Данная статья является продолжением исследования, в котором выявлен сдвиг даты начала нагрева в южной и юго-восточной части на более поздние сроки (4–5 дней за 10 лет), и наоборот, сдвиг на более ранние сроки в северной и северо-восточной части моря (4–5 дней за 10 лет). Для дат окончания нагрева наблюдается обратная ситуация, чем для дат начала нагрева. В южной части отмечается сдвиг на более ранние сроки (1–2 дня за 10 лет), в северной – на более поздние сроки на (4–5 дней за 10 лет). Продолжительность холодного периода (ПХП) в БМ в среднем составляет 7–8 месяцев. Вдоль побережья, в районе Мурманского мелководья и Северо-Канинской банки, ПХП составляет 210–230 дней. В районах теплых течений (Западно-Шпицбергенского, Нордкапского) ПХП выше. Коэффициент линейного тренда ПХП в северной части моря отрицательный, порядка –0,2 сут./год, но почти всюду статистически незначимый. В южной и центральной частях моря тренд ПХП положительный, около 0,2–0,3 сут./год, но также статистически незначим на большей части акватории.

Количественные оценки вклада отдельных составляющих в формирование теплообмена на поверхности океана за периоды охлаждения и нагрева важны для уточнения закономерностей формирования верхнего квазиоднородного слоя моря. Основная цель статьи – характеристика изменчивости теплоотдачи и роль составляющих теплового баланса в ней за холодный период года (период выхолаживания поверхности моря). Дополнительно проанализирована изменчивость летнего нагрева поверхности моря, поскольку количество отдаваемого морем

в атмосферу тепла за последующее охлаждение в холодный период и суммарный годовой ТБ, а также его многолетняя изменчивость могут зависеть от летнего нагрева. Оценивается вклад потоков явного и скрытого тепла в наблюдающееся в БМ увеличение суммарной теплоотдачи за холодный период года на границе море – атмосфера. Предпринята попытка выяснить, с какой именно из этих двух составляющих ТБ в большей степени связано наблюдающееся увеличение сезонной теплоотдачи.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использованы данные потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла, температуры воздуха (2 м), температуры поверхности моря и скорости ветра из атмосферного реанализа Европейского центра по среднесрочному прогнозированию погоды ERA5 (Европейский реанализ, версия 5) с горизонтальным разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$  по широте и долготе и шагом по времени 1 час. Составляющие теплового баланса в реанализе рассчитываются по аэродинамическим балк-формулам (упрощенные объемные формулы). Анализ выполнен для интервала с 1979 по 2019 г.

ТБ поверхности моря рассчитан как сумма потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла. Данные были осреднены

посуточно. Тепловой баланс сглажен 30-дневным скользящим средним. Даты перехода ТБ через ноль для каждого периода определены следующим образом: выбраны те даты, после которых продолжительность периода с положительным / отрицательным тепловым балансом была наибольшей. Даты перехода ТБ через ноль приняты за границы теплового и холодного периодов года. Рассчитана сумма ТБ, а также потоки явного и скрытого тепла за теплый и холодный периоды каждого года ( $\Sigma P$  и  $\Sigma LE$ ). Сумма ТБ за холодный период имеет отрицательный знак, а ее модуль отражает сезонную теплоотдачу с поверхности моря (выхолаживание поверхности).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Тепловой баланс поверхности моря в теплый и холодный периоды года.** Для характеристики пространственной изменчивости нагрева и охлаждения поверхности моря рассчитано среднее значение суммы ТБ за 40 теплых и холодных периодов (рис. 1). В теплый период суммарный ТБ поверхности моря севернее  $76^\circ$  с. ш. в среднем распределен зонально, а южнее  $76^\circ$  с. ш. наблюдается нарушение зональности (секторность), связанное, по всей видимости, с действием течений и близостью материка (см. рис. 1, А).

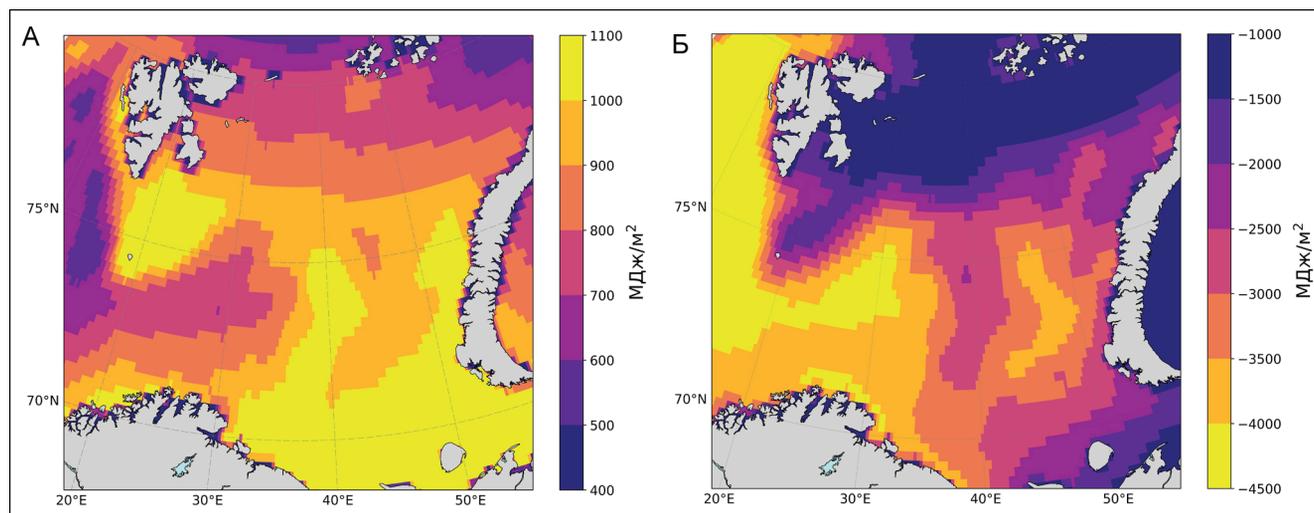


Рис. 1. Средняя сумма теплового баланса поверхности моря за теплый (А) и холодный (Б) периоды 1979–2019 гг.

Fig. 1. Average sum of the sea surface heat balance for the warm (A) and cold (B) periods of year for 1979–2019

Максимальные значения суммы ТБ ( $1100 \text{ МДж/м}^2$ ) расположены вдоль пути следования южной ветви Нордкапского течения, в районе Мурманского мелководья, Северо-Канинской и Гусиной банок. Такие же высокие значения наблюдаются в районе Шпицбергенской банки, где протекает холодное Восточ-

но-Медвежинское течение. В северной части моря, где доминирует арктическая холодная водная масса, сумма ТБ поверхности моря за теплый период в среднем составляет от 700 до  $800 \text{ МДж/м}^2$ .

В холодный период года на всей акватории моря наблюдается теплоотдача с поверхности. Простран-

ственное распределение суммы ТБ поверхности моря (см. рис. 1, Б) соответствует траектории переноса атлантических вод, включая максимумы над центральной ветвью Нордкапского течения и Западно-Новоземельским течением, а также локальный минимум над Центральной банкой (75° с. ш., 38° в. д.), который связан с формированием в этом районе купола плотных холодных вод в период выхолаживания [Ivanov, Tuzov, 2021]. Средняя сумма ТБ за холодный период уменьшается с юга на север. Максимальная по абсолютной величине средняя сумма ТБ в холодный период наблюдается в проливе Фрама (–4500 МДж/м<sup>2</sup>). В Баренцевом море максимальная абсолютная величина суммы ТБ наблюдается в районе центральной ветви Нордкапского течения: 72–73° с. ш., 20–30° в. д. (значения в интервале от –4500 до –4000 МДж/м<sup>2</sup>). Несколько ниже абсолютные значения данного параметра в районе южной ветви Нордкапского течения (от –4000 до –3500 МДж/м<sup>2</sup>). Высокие по абсолютной величине значения суммы ТБ наблюдаются также вдоль траектории теплого Новоземельского течения (от –4000 до –3000 МДж/м<sup>2</sup>). Однако в районе Центрального желоба наблюдается заметное понижение средней теплоотдачи в холодный период (сумма ТБ за период до –3000 МДж/м<sup>2</sup>) в сравнении

с соседними районами. В районе Шпицбергенской банки отмечается высокий градиент средней суммы ТБ и существенно менее высокие значения, чем в соседнем районе между островом Медвежий и мысом Нордкап. В этом районе сумма ТБ за холодный период составляет до –2000 МДж/м<sup>2</sup>. Вероятно, такие отличия связаны с действием холодного Восточно-Шпицбергенского течения. В районе положения полярного фронта (76–77° с. ш., 20–55° в. д.) [Трофимов и др., 2018] наблюдается максимальный градиент суммы теплового баланса за холодный период. На севере Баренцева моря, где последние 40 лет наблюдается сезонный морской лед, отмечается минимальная абсолютная величина суммы ТБ (от –1500 до –1000 МДж/м<sup>2</sup>).

Максимальная по абсолютной величине теплоотдача наблюдается вдоль западного побережья архипелага Шпицберген (2500–3000 МДж/м<sup>2</sup>). В районе поступления атлантических вод, между мысом Нордкап и островом Медвежий, теплоотдача с поверхности моря в холодный период составляет в среднем от 1500 до 2500 МДж/м<sup>2</sup>, а в районе Шпицбергенской банки – 1000–1500 МДж/м<sup>2</sup>, в отдельные годы, например в 2012 г., – от 1500 до 2000 МДж/м<sup>2</sup>. Некоторые статистические параметры для характерных районов приведены в таблице.

Таблица

**Статистики суммы теплового баланса за холодный период года  
(теплоотдача с поверхности моря, МДж/м<sup>2</sup>) в контрольных точках**

| Координаты        | Среднее | СКО   | Минимум (год)  | Максимум (год) |
|-------------------|---------|-------|----------------|----------------|
| 73° с.ш. 30° в.д. | –3924,5 | 396,7 | –4787,2 (1980) | –3190,4 (1984) |
| 75° с.ш. 40° в.д. | –2601,5 | 410,7 | –3304,7 (1992) | –1501,9 (1981) |
| 76° с.ш. 50° в.д. | –2627,8 | 654,6 | –3626,2 (2001) | –1157,7 (1981) |

В целом минимальная теплоотдача с поверхности моря за холодный период наблюдалась в начале 1980-х гг. Максимальные значения выхолаживания наблюдались в 1980, 1992 и 2001 гг.

**Коэффициент линейного тренда теплоотдачи с поверхности моря.** Для характеристики долгопериодной изменчивости рассчитаны коэффициенты линейного тренда суммы ТБ за теплый и холодный периоды в Баренцевом море за 40 лет (рис. 2).

Коэффициент линейного тренда суммы ТБ за теплый период года отрицательный в южной, юго-западной, центральной части моря (рис. 2, А). Положительный тренд – в северной, северо-западной части моря. Минимальный значимый тренд наблюдается в районе Западного и Центрального желобов, вдоль западного побережья архипелага Шпицберген (до –500 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет). На всей остальной южной и центральной части акватории линейный тренд

не значим и составляет от –100 до –400 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет. В проливе между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, а также в районе возвышенности Персея линейный тренд не значим и составляет от 0 до 200 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет. Наиболее высокий значимый положительный линейный тренд суммы ТБ за теплый период наблюдается в районе между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля (от 200 до 300 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет).

Выявлено статистически значимое ( $p < 0,05$ ) увеличение теплоотдачи в холодный период года на части акватории Баренцева моря. В северной и восточной частях Баренцева моря преобладают отрицательные статистически значимые величины коэффициента линейного тренда суммы ТБ за холодный период (см. рис. 2, Б). То есть там наблюдается увеличение количества тепла, отдаваемого океаном в атмосферу в холодный период. В южной и юго-за-

падной части преобладают положительные, но, за исключением нескольких относительно небольших участков к востоку от острова Медвежьего, статистически незначимые величины коэффициента линейного тренда суммы ТБ в холодный период. В районе возвышенности Персея, желоба Франц-Виктории, между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа отмечается тренд на увеличение теплоотдачи на 500–2000 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет в холодный период. Максимальное увеличение теплоотдачи с поверхности моря выявлено в проливе между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа. В районе Новоземельской банки тренд увеличения теплоотдачи с поверхности моря составляет 500–1000 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет. В южной и центральной частях моря отмечается уменьшение теплоотдачи в холодный период за ис-

следуемый ряд лет. В районе Шпицбергенской банки тренд показывает уменьшение теплоотдачи с поверхности моря на величину до 1000 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет. В районе между островом Медвежьим и мысом Нордкап коэффициент линейного тренда суммы ТБ за холодный период положительный (до 500 МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет), что говорит об уменьшении теплоотдачи за холодный период года.

В районе Мурманского мелководья и Северо-Канинской банки также наблюдаются положительные, но статистически незначимые величины тренда ( $p > 0,05$ ). В районе положения средней за 40 лет кромки льда [Сумкина и др., 2022a] коэффициент линейного тренда теплового баланса в холодный период отрицателен и близок к 0, однако также статистически не значим.

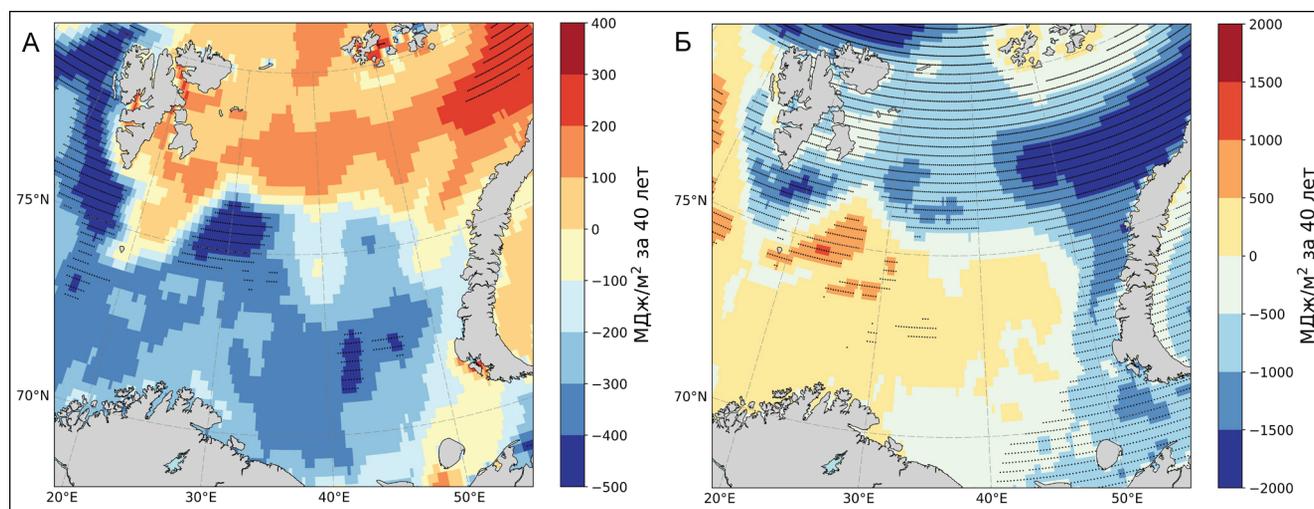


Рис. 2. Коэффициент линейного тренда суммы ТБ поверхности моря за теплый (А) и холодный (Б) периоды 1979–2019 гг. Точками отмечены узлы сетки с  $p < 0,05$

Fig. 2. Linear trend of seasonal sum of sea surface heat balance for the warm (A) and cold (B) periods of the year, for time interval from 1979 to 2019. Dots mark grid nodes with  $p < 0,05$

В южной, юго-западной и центральной частях моря в теплый период года отмечается уменьшение поступления тепла из атмосферы к поверхности моря, но также уменьшение теплоотдачи в атмосферу в холодный период. В северной и северо-восточной частях моря в теплый период отмечается увеличение поступления тепла из атмосферы к поверхности моря, но также наблюдается увеличение теплоотдачи в атмосферу в холодный период.

**Сумма потоков явного и скрытого тепла за холодный период года.** На рис. 3 представлен ход суммы теплового баланса, а также сумм потоков скрытого ( $\sum LE$ ) и явного тепла ( $\sum P$ ) за холодный период года в контрольных точках. Наибольшие значения всех этих величин наблюдаются в южной части БМ, где протекает теплое Нордкапское течение (см. рис. 3, А).

Наименьшие значения суммы потоков скрытого и явного тепла в период охлаждения наблюдаются в северной части моря. Согласно [Репина и др., 2011] потоки скрытого и явного тепла минимальны над толстым и в особенности над многолетним льдом, который характерен для северных районов моря (см. рис. 3, В).

Низкие средние за 40 лет значения  $\sum P$  в пределах рассматриваемой акватории отмечаются в районе банки Тромсе и разреза мыс Нордкап – остров Медвежий (от –2000 до –1500 МДж/м<sup>2</sup>), а максимальное – в северной части моря, а также в районе желоба Франц-Виктория (от –500 до 0 МДж/м<sup>2</sup>). Абсолютный минимум  $\sum P$  отмечается вдоль западного побережья архипелага Шпицберген (от –3000 до –2500 МДж/м<sup>2</sup>). В районе Центральной возвы-

шенности среднее значение  $\sum P$  за исследуемый интервал составляет от  $-1000$  до  $-500$  МДж/м<sup>2</sup>. В районе Западного и Центрального желобов – от  $-1800$  до  $-1600$  МДж/м<sup>2</sup>. Вдоль Новоземельской банки и акватории северного побережья архипелага Новой Земли – от  $-1100$  до  $-600$  МДж/м<sup>2</sup>.

Коэффициент линейного тренда суммы потоков явного тепла за холодный период с 1979 по 2019 г. показывает тенденцию на увеличение отдачи тепла морем за счет явного теплообмена в северной и северо-восточной частях моря. В проливе между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа линейный тренд явного теплообмена составил около  $1200$  МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет. В районе возвышенности Персея линейный тренд близок к 0. В южной и юго-западной части моря отдача тепла морем в атмосфере

за счет явного теплообмена наоборот уменьшается на величину  $500$ – $1000$  МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет.

Низкие средние значения  $\sum LE$  за 40 лет в пределах рассматриваемой акватории отмечаются в южной и юго-западной частях моря (от  $-2000$  до  $-1500$  МДж/м<sup>2</sup>), а максимальные – в северной части, в районе желоба Франц-Виктория (от  $-250$  до  $0$  МДж/м<sup>2</sup>). Абсолютный минимум  $\sum LE$  отмечается вдоль границы с Норвежско-Гренландским бассейном (от  $-3000$  до  $-2500$  МДж/м<sup>2</sup>). В районе Центральной возвышенности среднее значение за исследуемый интервал лет составляет от  $-1300$  до  $-800$  МДж/м<sup>2</sup>. В районе Западного и Центрального желобов – от  $-1600$  до  $-1300$  МДж/м<sup>2</sup>. Вдоль Новоземельской банки и акватории северного побережья архипелага Новой Земли – от  $-800$  до  $-500$  МДж/м<sup>2</sup>.

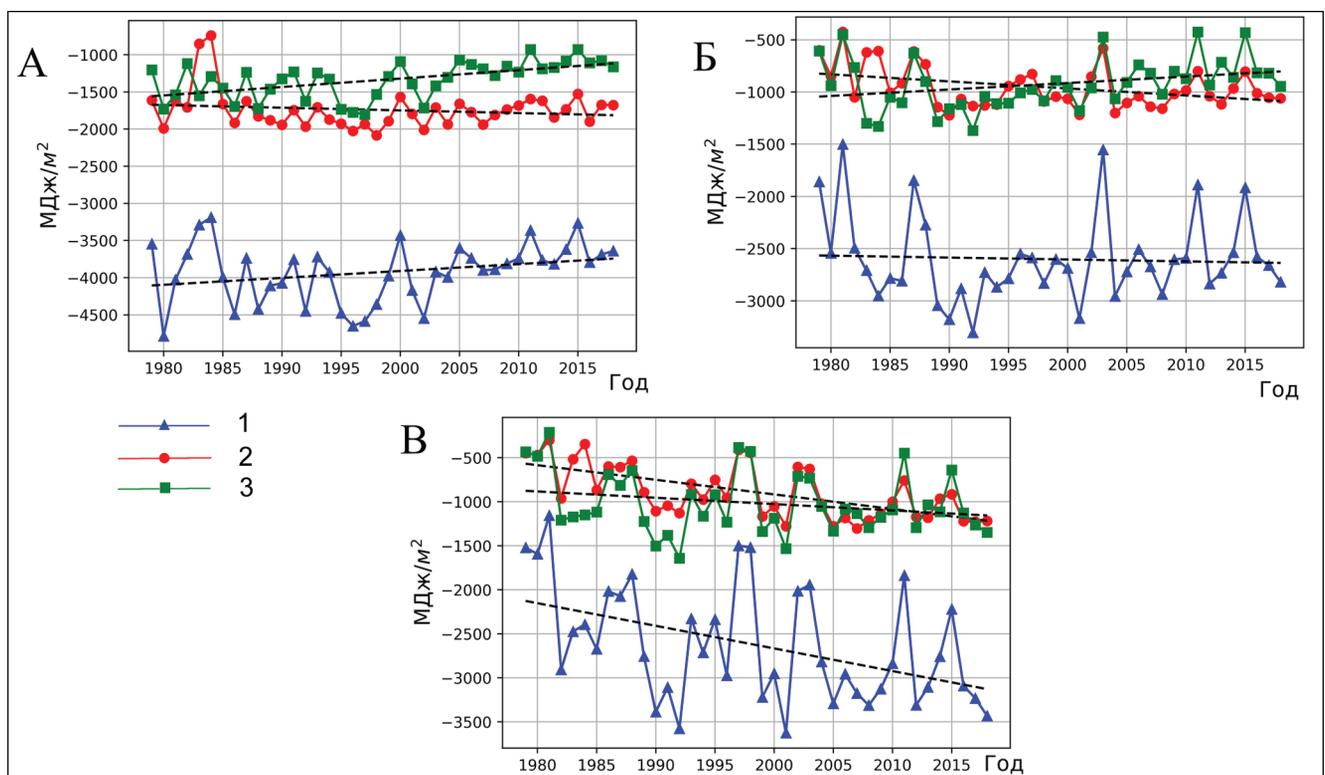


Рис. 3. Суммы теплового баланса (1), потока скрытого тепла (2) и потока явного тепла (3) за холодный период года для контрольных точек: А –  $73^\circ$  с. ш.,  $30^\circ$  в. д.; Б –  $75^\circ$  с. ш.,  $40^\circ$  в. д.; В –  $76^\circ$  с. ш.,  $50^\circ$  в. д.

Fig. 3. Time-series of sum of surface heat balance (1), sum of latent heat flux (2) and sum of sensible heat flux (3) for the cold period of the year for control points: А –  $73^\circ$  N,  $30^\circ$  E; Б –  $75^\circ$  N,  $40^\circ$  E; В –  $76^\circ$  N,  $50^\circ$  E

Коэффициент линейного тренда суммы потока скрытого тепла за холодный период с 1979 по 2019 г. на всей исследуемой акватории за исключением юго-восточного района имеет отрицательные значения. То есть теплоотдача с поверхности моря за счет испарения в целом увеличивается год от года. Максимальный отрицательный линейный тренд  $\sum LE$  отмечается в проливе между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа и составляет от  $-1000$  до

$-800$  МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет. В районе Центрального желоба линейный тренд  $\sum LE$  составляет от  $-400$  до  $-200$  МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет. В районе поступления атлантических вод, между островом Медвежий и мысом Нордкап, линейный тренд  $\sum LE$  близок к 0. Только в районе Шпицбергенской банки линейный тренд  $\sum LE$  положительный и составляет  $200$  МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет. В северо-восточной и северной частях моря тренд  $\sum LE$  составляет около  $300$  МДж/м<sup>2</sup> за 40 лет.

Согласно представленным результатам, теплоотдача с поверхности моря в холодный период года за последние 40 лет значительно увеличилась в северной и уменьшилась в южной части моря. Максимальное увеличение теплоотдачи в холодный период с поверхности моря составляет в среднем  $2000 \text{ МДж/м}^2$  за 40 лет и наблюдается в районе действия холодных течений Макарова и Центрального, а также в зоне преобладания арктических водных масс (см. рис. 3В). В этих же районах в теплый период также наблюдается увеличение поступления тепла из атмосферы на  $100\text{--}300 \text{ МДж/м}^2$  за 40 лет. Уменьшение теплоотдачи в атмосферу с поверхности моря на величину порядка  $500 \text{ МДж/м}^2$  за 40 лет наблюдается в районе Нордкапского течения, где выделяются атлантические водные массы. В этом же районе в теплый период года также наблюдается уменьшение поступления тепла из атмосферы на  $100\text{--}300 \text{ МДж/м}^2$  за 40 лет. Разница между суммой теплового баланса за холодный период и суммой за теплый период в среднем по всей акватории составляет  $1000\text{--}1500 \text{ МДж/м}^2$ . То есть с поверхности Баренцева моря за холодный период отдается тепла в среднем в 1,5–2 раза больше, чем поступает летом. Это означает, что в последние 40 лет возросла роль Баренцева моря как энергоактивной зоны, обеспечивающей перекачку тепла из океана в атмосферу, что противоположно выводу об ослаблении роли Баренцева моря как «климатического холодильника» (cooling machine) [Skagseth et al., 2020]. Подобное расхождение, вероятно, связано с тем, что в процитированной выше статье рассматривался только летне-осенний сезон, в который, как показано в данной статье, наблюдается увеличение поступление тепла из атмосферы в океан.

Установлено, что значительный вклад в изменчивость теплоотдачи в холодный период года вносит турбулентный теплообмен. Доля  $\sum P$  от интегральной теплоотдачи в холодный период в районе Центральной возвышенности составляет 0,3–0,4, а в районе Шпицбергенской банки и в проливе между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Шпицберген – 0,1–0,2. По всей акватории Баренцева моря наблюдается положительный линейный тренд доли  $\sum P$  в интегральной теплоотдаче. Максимальный линейный тренд этой доли наблюдается в северо-восточной части моря и составляет 0,32 за 40 лет. Возможное объяснение выявленной закономерности заключается в устойчивом отступании границы зимнего ледяного покрова к северу в этой части моря, что ведет к повышению температуры в Западно-Новоземельском течении и за счет этого к возрастанию теплоотдачи в холодный период в этом районе [Lind et al., 2018]. За десятилетие (1998–2008) сокращение годовой площади морского льда составило

$218 \times 10^3 \text{ км}^2$ , или близко к 50% [Arthun et al., 2012]. С 1979 г., когда началось непрерывное спутниковое зондирование ледяного покрова, площадь арктического морского льда в сентябре (месяц климатологического минимума площади морского льда) сокращалась примерно на 11% за десятилетие, а в начале XXI в. темпы сокращения ускорились [Семенов и др., 2017]. Косвенно этот тезис подтверждается тем, что в районах, где заметных изменений ледовых условий не произошло, возрастание вклада  $\sum P$  в интегральную теплоотдачу в разы меньше. Например, над Центральной возвышенностью доля  $\sum P$  в интегральной теплоотдаче увеличилась на 0,16 за 40 лет, а в южной и юго-западной частях моря – всего на 0,08. Тренды доли  $\sum LE$  в интегральной теплоотдаче также согласуются со сформулированным выше объяснением: в северной части моря наблюдается положительный линейный тренд доли  $\sum LE$ , а в центральной и южной – отрицательный. При этом максимальный положительный тренд доли  $\sum LE$  в интегральной теплоотдаче наблюдается там же, где наблюдается максимальный положительный тренд доли  $\sum P$  – в северо-восточной части моря, где величина этого тренда составляет 0,6 за 40 лет, тогда как над Шпицбергенской банкой и в южной-юго-западной частях моря этот тренд отрицателен и составляет  $-0,4$  и  $-0,03$  за 40 лет соответственно.

Расчеты показали, что линейный тренд доли турбулентного теплообмена ( $\sum P + \sum LE$ ) в общем теплообмене за холодный период года на акватории Баренцева моря положительный в северной и северо-восточной частях моря. В южной, юго-восточной и центральной частях моря линейный тренд близок к 0.

Для выявления причин межгодовой изменчивости выхолаживания поверхности моря выполнен анализ тенденций в сумме величин отдельных составляющих теплового баланса за период охлаждения. Анализ показал, что в северной и северо-восточной частях моря отдача тепла за счет явного теплообмена увеличивается (коэффициент линейного тренда суммы потока явного тепла за период охлаждения поверхности составил  $-500\text{--}1500 \text{ МДж/м}^2$  за 40 лет). В южной и юго-западной частях моря наблюдается обратная тенденция: отдача тепла в период охлаждения поверхности постепенно уменьшается (коэффициент линейного тренда суммы потока явного тепла за период охлаждения положительный,  $500\text{--}1000 \text{ МДж/м}^2$  за 40 лет). При этом теплоотдача за счет потока скрытого тепла почти на всей акватории моря увеличивается (коэффициент линейного тренда суммы потока скрытого тепла за период охлаждения на большей части акватории составляет  $-200\text{--}800 \text{ МДж/м}^2$  за 40 лет). То есть на севере и северо-востоке моря тенденции этих двух составля-

ющих имеют одинаковый знак, а в южной и юго-западной части моря они разнонаправленны, но преобладает рост теплоотдачи за счет явного потока тепла.

Величины явного и скрытого турбулентного теплообмена зависят от разности температуры поверхности моря и приземной температуры воздуха, а также от скорости ветра. С целью оценки того, какой из этих параметров внес наибольший вклад в наблюдаемые тренды потоков тепла, была проанализирована их изменчивость на исследуемом временном интервале. Для выявления роли каждого из

этих параметров выбраны три контрольные точки (см. рис. 3) в северо-восточной, центральной и юго-западной частях моря ( $76^\circ$  с. ш.,  $50^\circ$  в. д.;  $75^\circ$  с. ш.,  $40^\circ$  в. д.;  $73^\circ$  с. ш.,  $30^\circ$  в. д.). Временная изменчивость аномалий разности приземной температуры воздуха (ПТВ) и температуры поверхности моря (ТПМ) с удаленной средней (за 40 лет) сезонной изменчивостью, сглаженная годовым скользящим средним представлена на рисунке 4. На рисунке 5 представлены временные ряды модуля скорости ветра для этих же контрольных точек.

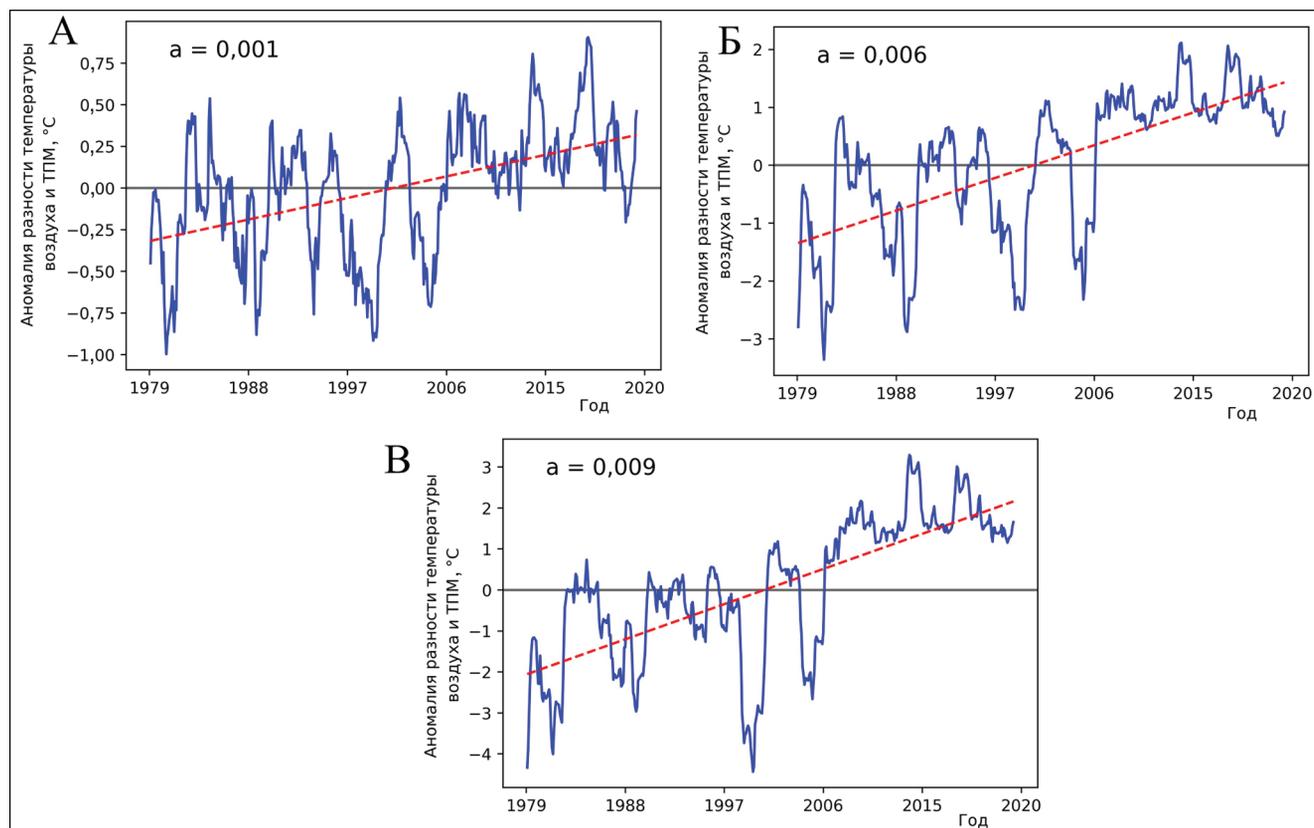


Рис. 4. Аномалии разности между температурой воздуха на 2 м и температурой поверхности моря для контрольных точек: А –  $73^\circ$  с. ш.,  $30^\circ$  в. д.; Б –  $75^\circ$  с. ш.,  $40^\circ$  в. д.; В –  $76^\circ$  с. ш.,  $50^\circ$  в. д.

Fig. 4. Anomalies of the difference between air temperature and sea surface temperature for control points: А –  $73^\circ\text{N}$ ,  $30^\circ\text{E}$ ; Б –  $75^\circ\text{N}$ ,  $40^\circ\text{E}$ ; В –  $76^\circ\text{N}$ ,  $50^\circ\text{E}$

Как следует из приведенных графиков, разность аномалий ТПМ и ПТВ во всех контрольных точках имеет положительный тренд ( $0,001$ – $0,009^\circ\text{C}$  за год), который обусловлен в большей степени ростом ПТВ (коэффициент линейного тренда аномалии ПТВ составляет от  $0,005^\circ\text{C}$  за год в точке А до  $0,012^\circ\text{C}$  за год в точке В). В контрольных точках в центральной, юго-западной, северо-восточной частях БМ коэффициент линейного тренда аномалии ТПМ составляет  $0,003^\circ\text{C}/\text{год}$ .

Наиболее значимое увеличение разности между ПТВ и ТПМ наблюдается в северо-восточной

части моря (на  $0,009^\circ\text{C}$  за год), что позволяет обоснованно связать указанный тренд с аналогичным трендом ТБ (см. рис. 3). При этом аномалия скорости ветра во всех трех контрольных точках хоть и подвержена существенной межгодовой изменчивости, характеризуется близким к нулю коэффициентом линейного тренда (см. рис. 5). Этот результат хорошо согласуется с работой [Суркова, Крылов, 2016]. В исследовании отмечается отсутствие многолетнего выраженного тренда экстремальных скоростей ветра над Баренцевым морем с 1981 по 2010 г., хотя для 1990-х гг. отмечается

увеличение значений скорости и рост повторяемости процессов меридионального типа. Это позволяет сделать заключение, что изменчивость скорости ветра практически не повлияла на выявленное возрастание теплоотдачи вследствие изменений турбулентного теплообмена между океа-

ном и атмосферой. Таким образом, можно сделать вывод, что тенденции теплоотдачи за счет явного потока тепла связаны не с изменением скорости ветра, а с изменением разности температур воды и воздуха, и, главным образом, с ростом температуры воды.

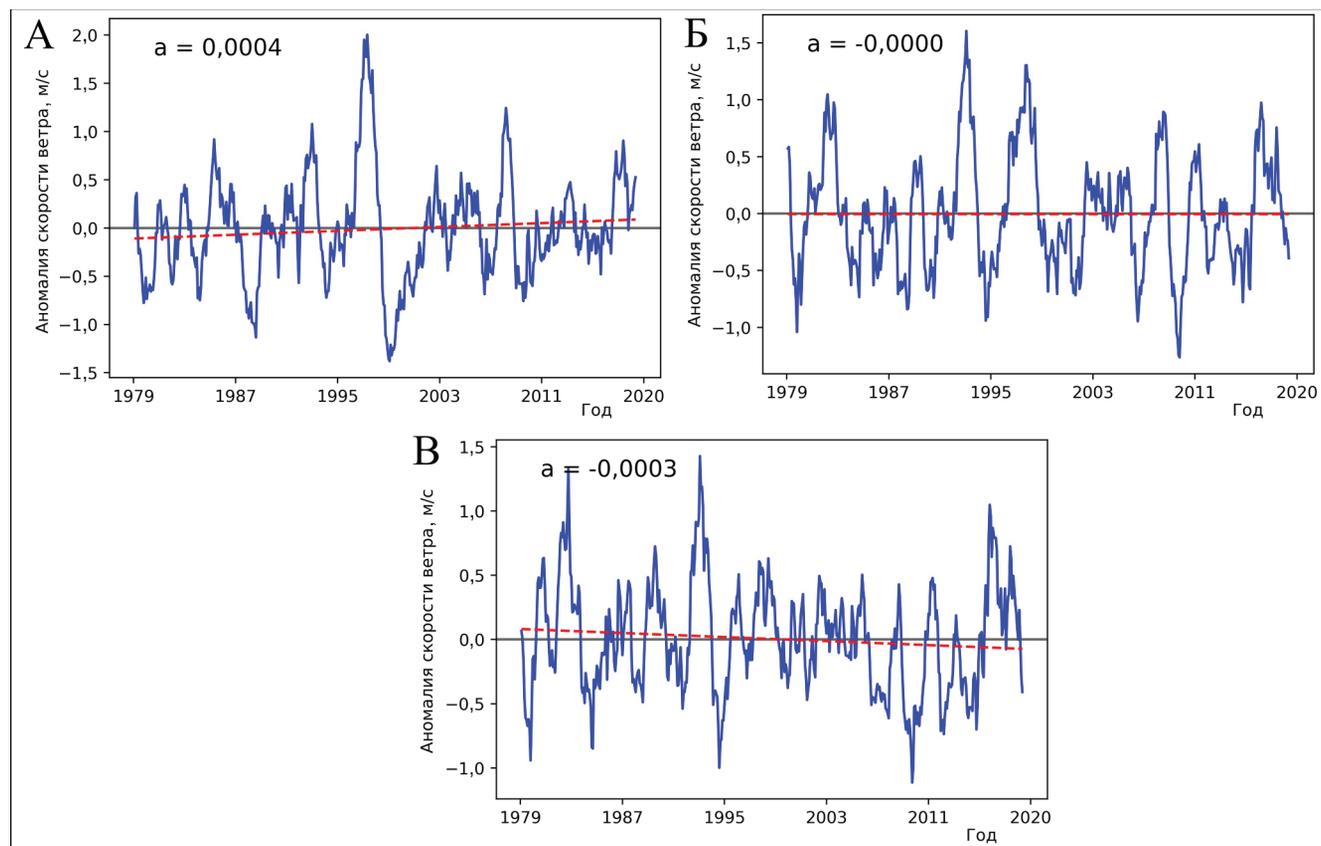


Рис. 5. Аномалии скорости ветра для контрольных точек:  
А – 73° с. ш., 30° в. д.; Б – 75° с. ш., 40° в. д.; В – 76° с. ш., 50° в. д.

Fig. 5. Wind speed anomalies for control points 73° N 30° E (A), 75° N 40° E (B), and 76° N 50° E (B)

### ВЫВОДЫ

В последние 40 лет возросла роль Баренцева моря как энергоактивной зоны, обеспечивающей перекачку тепла из океана в атмосферу. Увеличение теплопотерь с поверхности моря наблюдается в холодный период. Тогда как в южной, юго-западной и центральной частях моря в теплый период года отмечается уменьшение поступления тепла из атмосферы к поверхности.

Пространственное распределение линейного тренда теплоотдачи за холодный период года по

акватории Баренцева моря неравномерно: наибольшее увеличение теплоотдачи наблюдается в северо-восточной части моря, где произошло значительное сокращение площади зимнего ледяного покрова, тогда как для южной части отмечены слабые тренды противоположного знака.

Выявленные изменения с высокой степенью вероятности объясняются возрастанием разности между ПТВ и ТПМ, обеспечивающим наблюдаемый тренд ТБ и его турбулентных составляющих.

**Благодарность.** Исследование выполнено в рамках научного проекта РНФ № 19-17-00110-П.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варенцов М.И., Репина И.А., Артамонов А.Ю. и др. Экспериментальные исследования энергообмена и динамики атмосферного пограничного слоя в Арктике в летний период // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Т. 361. С. 95–127.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1: Баренцево море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 280 с.
- Заболотских Е.В., Гурвич И.А., Шапрон Б. Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова // Исследование земли из космоса. 2015. № 2. С. 64–77.
- Иванов В.В., Архипкин В.С., Лемешко Е.М. и др. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2022. № 1. С. 13–25.
- 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.
- Кивва К.К., Селиванова Ю.В., Писарева М.Н., Сумкина А.А. Роль физических процессов в формировании весеннего «цветения» фитопланктона в Беринговом море // Труды ВНИРО. 2020. Т. 181. С. 206–222. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-206-222.
- 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. Сер. Вклад России в Международный полярный год 2007/08. М.; СПб.: Paulsen AARI, 2011. С. 236–250.
- Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К. и др. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей СМIP3 и СМIP5 // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107.
- 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.
- Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В. Анализ изменений параметров зимнего теплового баланса Баренцева моря / Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса: материалы X Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Москва, 10–11 ноября 2022 года. Федеральное агентство по рыболовству, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии». М.: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии. 2022а. С. 397–399.
- Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В., Смирнов А.В. Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022б. № 15(1). С. 82–97. DOI: 10.48612/frg/1ktr-xbuk-6grz.
- 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.
- 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.
- Суркова Г.В., Романенко В.А. Сезонные и многолетние изменения турбулентных потоков тепла между морем и атмосферой в западном секторе Российской Арктики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021б. № 4. С. 74–82.
- Суркова Г.В., Романенко В.А. Современная изменчивость энергообмена с атмосферой в Баренцевом море // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики. 2020. С. 217–219.
- Тепловой баланс земной поверхности / под ред. М.И. Будыко. Л.: Гидрометеоиздат, 1956. 256 с.
- Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Ившин В.А. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Труды ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 79–91.
- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat, *Journal of Climate*, 2012, vol. 25, no. 13, p. 4736–4743, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
- Ivanov V.V., Tuzov F.K. Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea, *Deep Sea Research, pt 1, Oceanographic Research Papers*, 2021, vol. 175, p. 103590.
- Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import, *Nature Climate Change*, 2018, vol. 8, no. 7, p. 634–639.
- Skagseth Ø., Eldevik T., Årthun M. et al. Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine, *Nat. Clim. Chang.*, 2020, vol. 10, p. 661–666, DOI: 10.1038/s41558-020-0772-6.
- Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*, 2013, vol. 51(3), p. 415–449, DOI: 10.1002/rog.20017.

Поступила в редакцию 06.04.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 14.02.2024

## HEAT BUDGET OF THE BARENTS SEA SURFACE IN WINTER

A.A. Sumkina<sup>1</sup>, V.V. Ivanov<sup>2</sup>, K.K. Kivva<sup>3</sup><sup>1,3</sup> Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,  
Department of Climate and Aquatic Ecosystem Dynamics<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology<sup>1</sup> Senior specialist, email: sumkinaaleksa@yandex.ru<sup>2</sup> Senior Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; email: vladimir.ivanov@aari.ru<sup>3</sup> Director of the Department, Ph.D. in Geography; email: kirill.kivva@gmail.com

Variability of the total heat balance (HB) of the Barents Sea during the cold period of the year has been studied. The cold period is that of cooling of the sea surface when the heat flux is permanently oriented towards the atmosphere. The contribution of two major components of the HB, i. e. sensible and latent heat fluxes, to the observed increase of the total winter heat transfer at the sea-atmosphere interface has been estimated. Data on short-wave and long-wave radiation fluxes, and sensible and latent heat values were obtained from the atmospheric reanalysis of the European Center for Medium-term Weather Forecasting ERA5. HB of the sea surface was calculated as a sum of short-wave and long-wave radiation fluxes and those of sensible and latent heat. The total HB, as well as the total flux of sensible and latent heat for the cold period were calculated by summing up the corresponding values between the start and end dates of the cooling season. Calculations demonstrated an increase in the sum of HB over the cold season for the northern part of the Barents Sea (up to 2000 MJ/m<sup>2</sup> over 40 years), and a decrease in the southern part of the sea (up to 1000 MJ/m<sup>2</sup> over 40 years). In the northern part of the sea, the contribution of sensible and latent heat fluxes decreases to 0,3–0,4. The observed trend of sum of HB over the cold season and its turbulent components could with high probability be explained by increasing difference between air temperature and sea surface temperature.

**Keywords:** sensible and latent heat fluxes, sea surface temperature, air temperature, Arctic

**Acknowledgments.** The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-17-00110-P).

## REFERENCES

- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat, *Journal of Climate*, 2012, vol. 25, no. 13, p. 4736–4743.
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR, t. 1, Barentsevo more, vyp. 1, Gidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. vol. 1, Barents Sea, iss. 1, Hydrometeorological conditions], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 280 p. (In Russian)
- Ivanov V.V., Tuzov F.K. Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea, *Deep Sea Research, pt I, Oceanographic Research Papers*, 2021, vol. 175, p. 103590.
- Ivanov V.V., Arkhipkin V.S., Lemeshko E.M. *u op.* Izmenenie gidrologicheskikh uslovii v Barentsevom more kak indikator klimaticheskikh trendov v evraziiskoi Arktike v XXI veke [Changes in hydrological conditions in the Barents Sea as an indicator of climatic trends in the Eurasian Arctic in the 21st century], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 1, p. 13–25. (In Russian)
- Kalavichchi K.A., Bashmachnikov I.L. K mekhanizmu polozhitel'noi obratnoi svyazi dolgosrochnoi izmenchivosti konvergentsii okeanicheskikh i atmosferykh potokov tepla i ploshchadi ledyanogo pokrova v Barentsevom more [On the mechanism of positive feedback of long-term variability of convergence of oceanic and atmospheric heat fluxes and ice cover area in the Barents Sea], *Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana*, 2019, vol. 55, no. 6, p. 171–181. (in Russian)
- Kivva K.K., Selivanova Yu.V., Pisareva M.N., Sumkina A.A. [The role of physical processes in the formation of phytoplankton spring “bloom” in the Bering Sea], *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2020, vol. 181, p. 206–222. (in Russian)
- Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import, *Nature Climate Change*, 2018, vol. 8, no. 7, p. 634–639.
- Mikhailova N.V., Yurovsky A.V. Analysis of Principal Components of the Sea Ice Concentration Fields in the Barents Sea, *Physical Oceanography*, 2017, vol. 194, no. 2, p. 11–18.
- Repina I.A., Artamonov A.Yu., Smirnov A.S., Chechin D.G. [Study of the ocean-atmosphere interaction in Polar regions within the framework of the International Polar Year], *Meteorologicheskie i geofizicheskie issledovaniya, Ser. Vklad Rossii v Mezhdunarodnyi polyarnyi god 2007/08* [Meteorological and geophysical studies, Ser. Contribution of Russia to the International Polar Year], Moscow, Saint Petersburg, Paulsen AARI Publ., 2011, p. 236–250. (in Russian)
- Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K. et al. Izmeneniye ploshchadi arkticheskikh morskikh ldov v ansamblyah klimaticheskikh modelej CMIP3 i CMIP5 [Arctic Sea ice area changes in CMIP3 and CMIP5 climate models' ensembles], *Led i Sneg*, 2017, 57 (1), p. 77–107. (in Russian)
- Sizov A.A., Mikhailova N.V., Bayankina T.M. Large-Scale Atmospheric-Oceanic Interaction Regimes in the Norwegian and Barents Seas, *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 484, no. 2, p. 203–206.

- Skagseth Ø., Eldevik T., Årthun M. et al. Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine, *Nat. Clim. Chang.*, 2020, vol. 10, p. 661–666, DOI: 10.1038/s41558-020-0772-6.
- Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system, *Reviews of Geophysics*, 2013, vol. 51(3), p. 415–449, DOI: 10.1002/rog.20017.
- Sumkina A.A., Kivva K.K., Ivanov V.V. [Analysis of changes in the parameters of the winter heat balance of the Barents Sea], *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya rybokhozyaistvennogo kompleksa: materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov*, Moskva, 10–11 noyabrya 2022 goda. *Federal'noe agentstvo po rybolovstvu, FGBNU "Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut rybnogo khozyaistva i okeanografii"*, Moskva, *Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut rybnogo khozyaistva i okeanografii* [Modern problems and prospects for the development of the fishery complex: materials of the X International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists, Moscow, November 10–11, 2022. Federal Fisheries Agency, Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography Publ.], 2022a, p. 397–399. (In Russian)
- Sumkina A.A., Kivva K.K., Ivanov V.V., Smirnov A.V. Sezonnoe ochishchenie oto l'da Barentseva morya i ego zavisimost' ot adveksii tepla Atlanticheskimi vodami [Seasonal ice removal in the Barents Sea and its dependence on heat advection by Atlantic waters], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2022b, vol. 15(1), p. 82–97, URL: <https://doi.org/10.48612/fpg/1krp-xbuk-6gpz>. (In Russian)
- Surkova G.V., Krylov A.A. Sinopticheskiye situatsii, sposobstvuyushchiye formirovaniyu ekstremal'nykh znacheniy skorosti vetra v Barentsevom more [Synoptic patterns of extreme wind speed in the Barents Sea], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 6, p. 18–25. (In Russian)
- Surkova G.V., Romanenko V.A. [Modern variability of energy exchange with the atmosphere in the Barents Sea], *Kompleksnye issledovaniya prirodnoi sredy Arktiki i Antarktiki* [Complex studies of the natural environment in Arctic and Antarctic], 2020, p. 217–219. (In Russian)
- Surkova G.V., Romanenko V.A. Izmenenie klimata i teploobmen mezhdou atmosferoi i okeanom v Arktike na primere Barentseva i Karskogo morei [Climate change and heat exchange between atmosphere and ocean in the Arctic based on data from the Barents and Kara Sea], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2021, vol. 67, no. 3, p. 280–292. (In Russian)
- Surkova G.V., Romanenko V.A. Sezonnye i mnogoletnie izmeneniya turbulentnykh potokov tepla mezhdou morem i atmosferoi v zapadnom sektore Rossiiskoi Arktiki [Seasonal and long-term changes of turbulent heat fluxes between sea and atmosphere in western sector of the Russian Arctic], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 4, p. 74–82. (In Russian)
- Teplovoi balans zemnoi poverkhnosti* [Thermal balance of the earth's surface], M.I. Budyko (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1956, 256 p. (In Russian)
- Trofimov A.G., Karsakov A.L., Ivshin V.A. [Climate change in the Barents Sea over the past half century], *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2018, vol. 173, p. 79–91. (In Russian)
- Varentsov M.I., Repina I.A., Artamonov A.Yu. et al. [Experimental studies of summer energy exchange and dynamics of the atmospheric boundary layer in the Arctic], *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra RF* [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the RF], 2016, no. 361, p. 95–127. (In Russian)
- Zabolotskikh E.V., Gurvich I.A., Shapron B. Novye raiony rasprostraneniya polyarnykh tsiklonov v Arktike kak rezul'tat sokrashcheniya ploshchadi ledovogo pokrova [New areas of distribution of polar cyclones in the Arctic as a result of the reduction of the ice cover area], *Issledovanie zemli iz kosmosa*, 2015, no. 2, p. 64–77. (In Russian)

Received 06.04.2023

Revised 15.10.2023

Accepted 14.02.2024