

Влияние изменчивости потоков тепла в районе Баренцева моря на температурный режим Западной Сибири в зимний период

Е.И. Усова, С.В. Логинов, Е.В. Харюткина*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический 10/3*

Поступила в редакцию 29.12.2017 г.

Исследована пространственно-временная изменчивость тепловых потоков на границе океан–атмосфера в районе Баренцева моря за 1976–2014 гг. Также рассчитаны сезонные изменения площади льда в арктическом секторе Сибири. Сокращение морского льда в последние десятилетия согласуется с ростом температуры поверхности океана, в отличие от которой потоки скрытого и явного тепла уменьшаются, причем в наибольшей степени это выражено в январе. Интенсивные изменения теплообмена на границе океан–атмосфера отмечаются в последние несколько лет. В начале XXI в. адвекция тепла из района Баренцева моря в среднем за зимний сезон осуществляется в основном в восточном направлении, а его приток в Западную Сибирь – через ее северную границу и составляет ~1%. При этом роль адвекции в изменении температуры и влажности воздуха в регионе значимо возросла в последние годы. Предполагается, что наиболее важное значение в зимнем похолодании в начале XXI в. в Западной Сибири имеет в первую очередь уменьшение переноса тепла и влаги с южного направления. Влияние же Баренцева моря на изменения потоков тепла проявляется опосредованно через изменения процессов крупномасштабной циркуляции на сопредельных с регионом территориях как следствие усиленного теплообмена за счет увеличения площади открытой воды.

Ключевые слова: потоки тепла, температура поверхности океана, температура воздуха, адвекция, Баренцево море, Западная Сибирь; heat fluxes, sea surface temperature, air temperature, advection, the Barents Sea, West Siberia.

Введение

Согласно результатам инструментальных наблюдений и модельных расчетов в последние 100 лет происходит глобальное потепление климата [1–5]. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в высоких широтах Северного полушария [3, 6]. Повышение зимних приповерхностных температур над областью морской Арктики отмечалось после 1991 г., а летних – после 1996 г., с абсолютным максимумом в 2012 г. [7]. Причиной ускоренного потепления считается изменение радиационного баланса вследствие увеличивающегося антропогенного воздействия [8]. Еще одной причиной могут быть изменения адвекции тепла и влаги с поверхности океанов за счет изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции и температуры поверхности океана [9]. Значительный вклад в потепление Арктики, согласно работам [10–12], вносит изменение атмосферной циркуляции с аномально сильной адвекцией тепла в высокие широты, которая

определяет почти 90% тренда средней температуры в Арктике.

Согласно оценкам, приведенным в [13], увеличение меридионального потока влаги в атмосфере северной полярной области, направленного со стороны Северного Ледовитого океана на материк в годы с минимальной ледовитостью, имеет место в западном секторе Российской Арктики вплоть до 100° в.д. На востоке, наоборот, преобладает перенос с материка на океан, и связано это с тем, что в данной части материка зимой господствует Азиатский антициклон. Установлено, что в периоды усиленной адвекции льда поток тепла от океана увеличился на 15–25% от его среднего значения [14].

Различные гипотезы предсказывают как уменьшение [15], так и увеличение [16] меридионального потока энергии.

Эксперименты с моделью общей циркуляции океана при использовании заданных по данным наблюдений вариаций атмосферного воздействия свидетельствуют, что меридиональный перенос тепла усиливался в последние десятилетия [17]. При этом сохранение темпов роста температуры в Арктике объясняется временной задержкой переноса тепла, обусловленной адвекцией аномалий.

* Евгения Ивановна Усова (seo@imces.ru); Сергей Владимирович Логинов (seo@imces.ru); Елена Валерьевна Харюткина (kh_ev@imces.ru).

Согласно [18] основной приток явного и скрытого тепла в зимний период поступает через атлантическую часть 70-й параллели от 0 до 80° в.д. в слое от поверхности до 750 гПа. При этом наибольшее влияние на зимнюю приповерхностную температуру наблюдается в области от Норвежского до Восточно-Сибирского моря с максимумами над Баренцевым и Карским морями.

Шельфовые моря Северного Ледовитого океана также оказывают влияние на изменчивость климата районов Северной Евразии. Например, в [10] показано, что сокращение площади морского льда и сильное потепление над Баренцевым морем в зимний период приводят к похолоданию над обширными областями северной части Евразии с увеличением вероятности аномально холодных январей в два и более раза. Такая тенденция характерна и для территории Западной Сибири, поскольку уменьшение концентрации льда в примыкающих к территории арктических морях изменяет меридиональный температурный градиент и, следовательно, крупномасштабный атмосферный поток в Северном полушарии [19]. Это вызвано образованием области повышенного давления с центром над южной границей Баренцева моря при уменьшении концентрации льда и аномальной адвекцией холодных воздушных масс с северо-востока [20].

Именно в зимний сезон в начале XXI в. выявлены наибольшие изменения в рядах климатических величин в Западно-Сибирском регионе [21]. В этот период процесс потепления сменился похолоданием, при этом отмечаются рост атмосферного давления и уменьшение влажности воздуха. Проведенные ранее исследования (в том числе авторами [22, 23]) показали, что для описания изменчивости региональной температуры (на примере азиатской территории России и Западной Сибири) в уравнениях теплового баланса необходимо учитывать слабое, описывающее адвекцию тепла ($\sim 1 \text{ Вт/м}^2$ в январе в среднем с 1979 по 2014 г.). При этом оценка влияния адвекции воздушных масс на температурный режим региона должна учитывать направление переноса воздуха.

Цель работы — исследование пространственно-временной изменчивости тепловых потоков на границе океан—атмосфера в районе Баренцева моря в период 1976—2014 гг. и их влияния на температурный режим Западно-Сибирского региона посредством адвективного переноса тепла и влаги.

Материалы и методы

Исследование адвективных потоков тепла и влаги с 1976 по 2014 г. проводилось по среднемесячным данным реанализа JRA-55 (The Japanese 55-year Reanalysis) с пространственным разрешением $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ по широте и долготе и месячным временным разрешением (http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html). Под изменчивостью величин, согласно терминологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата [3], понимались вариации среднего состояния характери-

сти. Подавление высокочастотного шума осуществлялось низкочастотной фильтрацией с шириной окна 10 лет, которая задавалась в соответствии с найденным периодом естественных колебаний температуры воздуха [24].

Исследование проводилось на двух временных интервалах: в период интенсивного глобального потепления (с 1976 по 1998 г.) и период замедления темпов роста глобальной температуры (с 1999 по 2014 г.). Значения температуры поверхности океана (ТПО) в Баренцевом море брались из базы данных NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/>), потоков скрытого (LE) и явного тепла (S) — из OAFflux (<http://oafux.who.edu/>), характеристик ледового покрова — по данным NSIDC (<https://www.nsidc.org/>). Приведенные базы данных имеют пространственное разрешение $1^\circ \times 1^\circ$. Зависимость потоков LE и S от состояния среды оценивалась по балк-формулам [25]. Исследование влияния Баренцева моря на изменчивость адвективного переноса тепла и влаги на территорию Западной Сибири проводилось для зимнего сезона в слое атмосферы 1000—850 гПа. Выбор слоя объясняется его слабым перемешиванием относительно вышележащих слоев атмосферы, что позволяет изучить эффект адвекции воздушных масс, не учитывая конвективные движения.

Для оценки переноса тепла из Баренцева моря в Западную Сибирь применялся алгоритм «траекторного анализа», дополненного элементами метода статистического моделирования. В процессе реализации алгоритма отслеживались «перемещение» и потери тепла в/из атмосферной ячейки (АЯ). Северное полушарие было разделено на 108 ячеек. Размеры модельной прямоугольной АЯ (10° по широте и 30° по долготе) примерно совпадали с размерами акватории Баренцева моря, служащей источником тепла. Потоки тепла и влаги, как входящие в АЯ, так и уходящие из нее, определялись на каждой границе ячейки по сумме потоков, рассчитанных в соответствующих узлах сетки реанализа. При этом выделялись слабые, характеризующие приток/вынос тепла, приток/вынос холода. При классификации учитывались направления вектора скорости ветра и градиента тепла.

Используя величины потоков, входящих и выходящих из АЯ, можно рассчитать долю тепла (или влаги), вышедшего из ячейки или вошедшего в нее через заданную грань. Конвективные потоки, выступающие в качестве дополнительных источников, на данном этапе не учитывались.

Таким образом, результат моделирования представляет собой приближенную оценку потока тепла, характеризующую осредненный перенос тепла по возможным траекториям от источника до исследуемого региона.

Количество траекторий/реализаций (M) выбиралось так, чтобы статистическая погрешность моделирования переноса не превышала 1–2%. Указанная погрешность задается для того, чтобы статистически значимо (хотя бы на уровне $\alpha = 0,05$)

различать потоки, приходящие через различные границы (их четыре в заданной геометрии моделирования). Описанная методика позволяет получить не только количественную оценку тепла (влаги), доставленного в регион, но и наиболее вероятные траектории его переноса.

В расчетах использовались среднемесячные значения величин. Погрешность расчета адвективных составляющих тепла и влаги определялась через среднеквадратическое отклонение. Проверка нулевой гипотезы при оценке коэффициентов линейных трендов и коэффициентов корреляций проводилась для $\alpha = 0,05$ [26].

Обсуждение результатов

Как отмечалось ранее, в последние несколько десятилетий в результате увеличения глобальной температуры воздуха наблюдается наиболее интенсивное уменьшение площади, концентрации и толщины арктических льдов [21]. Были получены соответствующие оценки и для Баренцева моря. Результаты регрессионного анализа сезонных изменений площади льда (табл. 1) показали, что сокращение площади ледового покрова в Баренцевом море происходит во все сезоны. При этом в начале XXI в. скорость уменьшения концентрации льда выросла в 2,5 раза — до 0,2 млн км²/10 лет, а зимой приблизительно в 4 раза — до 0,26 млн км²/10 лет.

Сокращение морского льда согласуется с ТПО в Баренцевом море. Так, ТПО увеличивалась до 2007 г. во все месяцы, а в дальнейшем наблюдалась ее стабилизация на уровне 2,2 °С в январе (рис. 1, *a*) и 5,4 °С в июле. Величина статистически значимых трендов поверхностной температуры

Баренцева моря за исследуемый период составила 0,41 °С/10 лет в январе и 0,28 °С/10 лет в июле.

Таблица 1
Средние значения (млн км²) и скорости сокращения (млн км²/10 лет) площади ледового покрова в Баренцевом море

Сезон	1976–1998 гг.		1999–2014 гг.	
	Средние	Тренды	Средние	Тренды
Зима	1,29	-0,07	1,08	-0,26
Весна	1,36	-0,14	1,20	-0,24
Лето	0,84	-0,11	0,67	-0,16
Осень	0,78	-0,02	0,63	-0,11
Год	1,07	-0,08	0,89	-0,20

Примечание. Здесь и далее полужирным выделены статистически значимые оценки ($\alpha = 0,05$).

В отличие от ТПО потоки LE и S уменьшаются, причем в наибольшей степени это выражено в январе. Согласно рис. 1, *б, в* временной ход LE и S в январе характеризуется уменьшением потоков тепла до 1992 г., дальнейшим ростом до 2001 г. и последующим уменьшением. Все изменения являются статистически незначимыми и свидетельствуют об одинаковых тенденциях во временном ходе потоков LE и S. Стоит отметить, что скорости уменьшения потоков LE и S в январе возрастают в начале XXI в. В июле отмечаются невысокие положительные статистически значимые тренды потоков тепла (-0,6 Вт/м²/10 лет и -0,04 Вт/м²/10 лет для LE и S соответственно).

Сравнение межгодовой изменчивости потоков тепла с ТПО и с $\Delta T = \text{ТПО} - T$, где T — температура приземной атмосферы (рис. 1, *з*), показывает,

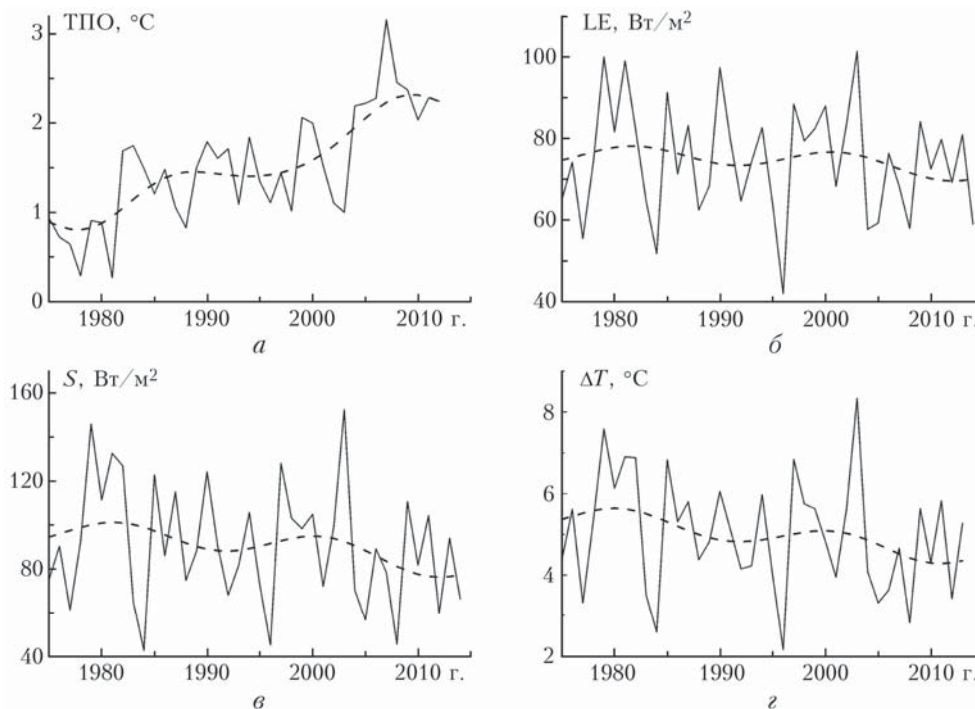


Рис. 1. Межгодовая изменчивость ТПО (*a*), потоков скрытого (*б*), явного тепла (*в*) и разности температур (*з*) в Баренцевом море в январе; пунктирная линия — сглаживание временного ряда с помощью фильтра низких частот

что изменчивость потоков тепла над Баренцевым морем в начале XXI в. определяется изменением температуры приземного воздуха, и в значительно меньшей степени — температурой поверхности океана. Только в последние несколько лет здесь наблюдаются наиболее интенсивные изменения теплообмена на границе океан–атмосфера.

Далее проводился расчет величин, характеризующих баланс адвективных потоков тепла и влаги в акватории Баренцева моря. Полученные средние многолетние оценки по двум выбранным временным интервалам (1976–1998 гг. и 1999–2014 гг.) позволили выявить их временную изменчивость и оценить роль Баренцева моря как источника тепла. Выявлено, что тенденции и изменчивость влагопереноса подобны поведению потока тепла, поэтому в дальнейшем изложении приводится анализ только характеристик теплопереноса. На рис. 2 приведены величины потоков (H_k^j), нормированные на приток тепла в первый интервал времени (проведенная нормировка сохраняет соотношение потоков), где H — адвекция тепла; j — индекс, обозначающий входящий (in) на территорию или выходящий (out) с территории потоки; k — обозначение теплых (w или ТВ) или холодных (c или ХВ) масс воздуха.

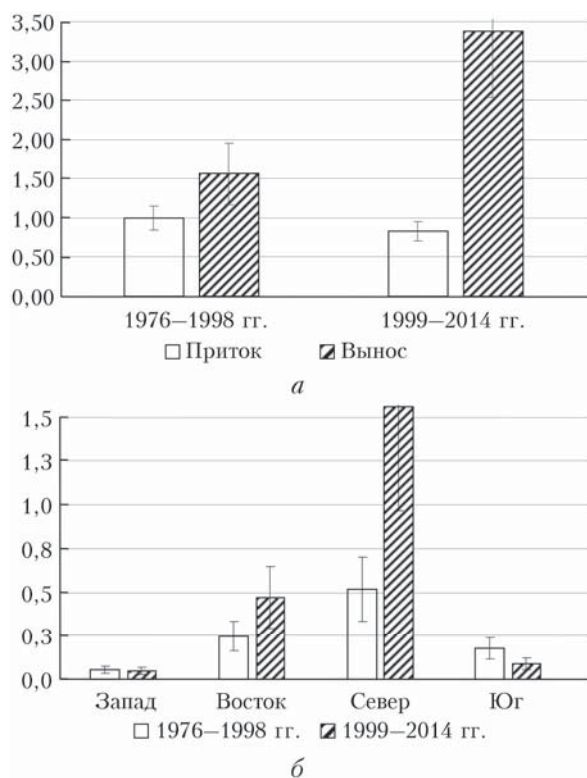


Рис. 2. Баланс адвективных потоков тепла H_w^{in} и H_w^{out} в январе в акватории Баренцева моря (а) и распределение выноса H_w^{out} по направлениям (б)

В январе (рис. 2, а) вынос тепла (H_w^{out}) в 1976–1998 гг. превышал приток тепла (H_w^{in}) в 1,6 раза, а в 1999–2014 гг. отношение H_w^{out}/H_w^{in} увеличилось до 3. Вынос тепла с акватории Баренцева моря происходит преимущественно в северном и восточ-

ном направлениях. Вынос тепла в южном направлении не превышает 20% (значимо не изменился). Как правило, в южном направлении выходит холодный влажный воздух, а в восточном — теплый влажный, что объясняется западным переносом теплых атлантических вод. Суммарный (по всем границам) ежегодный вынос тепла из Баренцева моря с 1976 по 1998 г. составил $1,8 \cdot 10^{12}$ Вт, а в период 1999–2014 гг. — $3,8 \cdot 10^{12}$ Вт (заштрихованные столбцы на рис. 2, б; величины нормированы на величину суммарного выхода за первый интервал времени).

Увеличение адвективного потока тепла и влаги с Баренцева моря происходило до 2000 г. (рис. 3, а), после чего наблюдается замедление его роста, проявляется тенденция к уменьшению выноса тепла. Одновременно в приземном слое атмосферы произошло увеличение температуры воздуха на ~ 4 °С и удельной влажности с $2,5 \cdot 10^{-4}$ до $3,5 \cdot 10^{-4}$ г/кг (рис. 3, в, д). Отмеченные изменения объясняются ростом ТПО и теплосодержания в Баренцевом море.

Эти факторы значительно усиливают теплообмен между океаном и атмосферой, что создает благоприятные условия для выноса тепла и влаги с границ Баренцева моря, оказывая влияние на климат северных регионов Евразии [20].

По описанной в разделе «Материалы и методы» скорректированной методике траекторного анализа были рассчитаны оценки величин адвективных потоков тепла (теплый / холодный воздух) и влаги (влажный / сухой воздух), поступивших в Западную Сибирь из Баренцева моря (табл. 2).

Таблица 2

Тепломассоперенос из Баренцева моря на территорию Западной Сибири

Показатель	1976–1998 гг.		1999–2014 гг.	
	Январь	Июль	Январь	Июль
Теплый воздух, Вт	$4 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^9$	$4,4 \cdot 10^{10}$
Холодный воздух, Вт	$4,7 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^{10}$
Влажный воздух, кг/с	$4,4 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^7$	$9,8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^7$
Сухой воздух, кг/с	$5,7 \cdot 10^3$	$5,6 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^6$

Из табл. 2 следует, что в 1999–2014 гг. в январе наблюдаются уменьшение поступления потока холодного воздуха на 10%, сухого — на 25% и увеличение притока теплого влажного воздуха в 2 раза. Подобные зависимости сохраняются для июля, однако изменчивость потоков меньше. В январе величина поступившего на территорию Западной Сибири потока из Баренцева моря составляет 1% от начальной величины. В июле количество потоков тепла и влаги возрастает до 20%.

Несмотря на то что величина тепломассопереноса из Баренцева моря в регион мала, представляется целесообразным получить оценки адвективных потоков тепла и выявить их временную изменчивость непосредственно для Западно-Сибирского региона в целом и отдельно на каждой его грани.

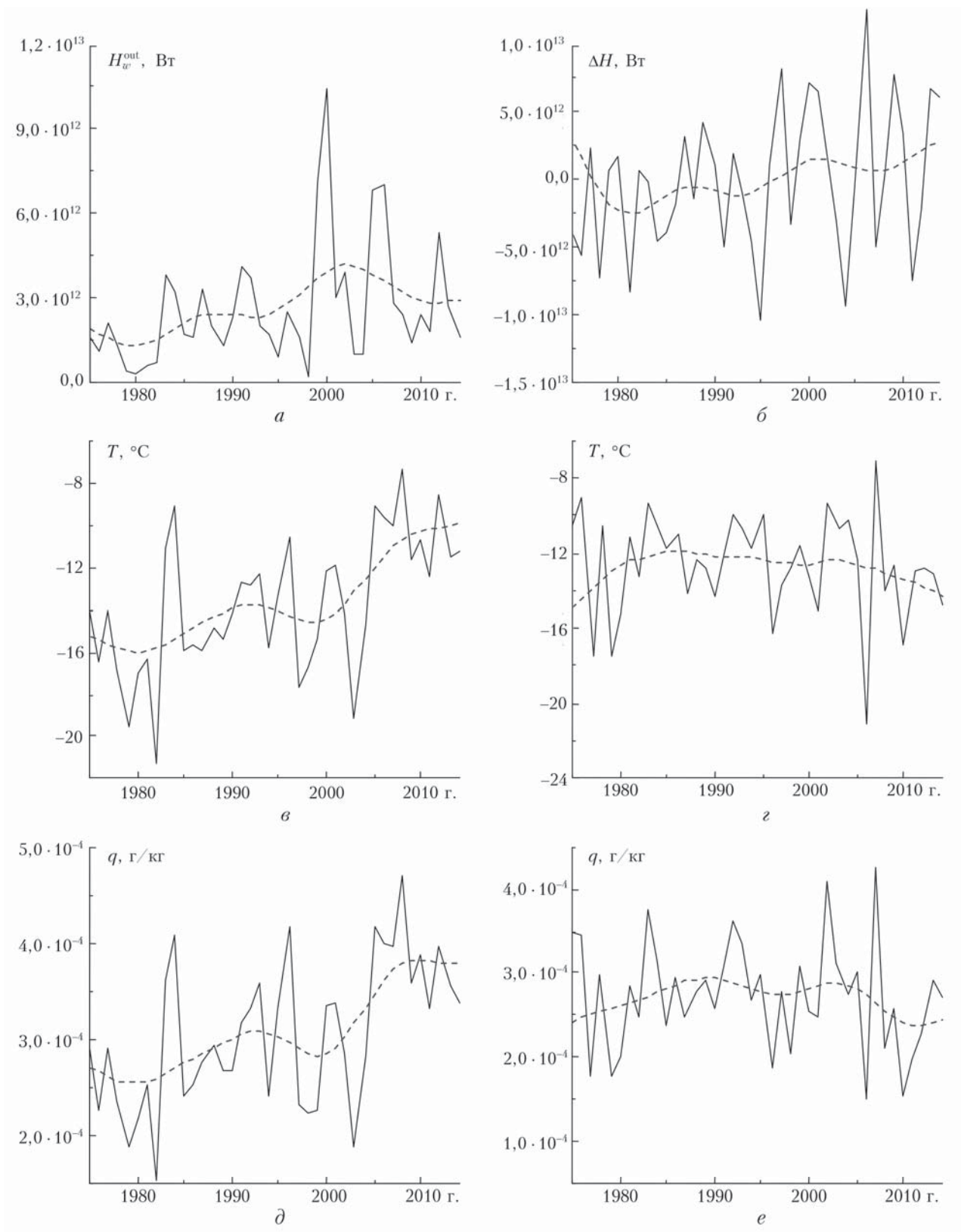


Рис. 3. Межгодовая изменчивость характеристик в районе Баренцева моря (вынос тепла H_w^{out} (а), температура (в), удельная влажность (д) приземного слоя атмосферы) и в Западной Сибири (ΔH (б), температура (г), удельная влажность (е) приземного слоя атмосферы) в январе

Это позволит выявить и оценить преобладающее направление переноса тепла на территорию в зимний сезон. Изменчивость температуры и влажности приземного слоя, а также соотношения потоков ТВ и ХВ, поступающих на территорию Западной Сибири в январе, приведены на рис. 3 и 4. На рис. 3, б представлена величина, которая характеризует адвекцию воздушных масс, связанную с термическим режимом территории (часть адвекции, которая связана с генерацией потоков или стоком тепла/влаги на территорию):

$$\Delta H = (H_w^{\text{in}} + H_c^{\text{in}}) - (H_w^{\text{out}} + H_c^{\text{out}}).$$

Отсутствие выраженной тенденции ΔH в начале XXI в. (изменения около нуля) говорит о существенном уменьшении величины потока. Поэтому уменьшение температуры (рис. 3, з) и влажности (рис. 3, е) в январе может быть связано с развитием антициклональной погоды, способствующей формированию радиационного выхолаживания.

Из рис. 4, а, б следует, что величины притоков и выноса тепла в XXI в. уменьшаются (здесь,

как и на рис. 2, величины потоков нормированы на приток тепла в первый интервал времени), что согласуется с тенденцией ΔH на рис. 3, а. С 1976 по 1998 г. примерно 96% тепла ($6,6 \cdot 10^{12}$ Вт) на территорию Западной Сибири поступало с южного направления, а ХВ — преимущественно с западного ($1,8 \cdot 10^{12}$ Вт). Вынос ТВ происходил в основном в северном ($6,9 \cdot 10^{12}$ Вт), а ХВ — в восточном направлении ($6,3 \cdot 10^{11}$ Вт). В начале XXI в. преобладающие направления переносов ТВ и ХВ не изменились. Теплые и влажные воздушные массы проходят в основном (~77%) через южную грань, а холодные и влажные (~32%) — через западную. Расчеты, проведенные по реанализу ERA-Interim, значимых отличий в результатах не выявили.

Полученные соотношения потоков подтверждают, что величина потока тепла, который может попасть непосредственно из акватории Баренцева моря на территорию Западной Сибири в январе, незначительна. Однако при этом стоит отметить, что траектория переноса, вероятно, будет связывать восточную часть акватории и северный район территории Сибири.

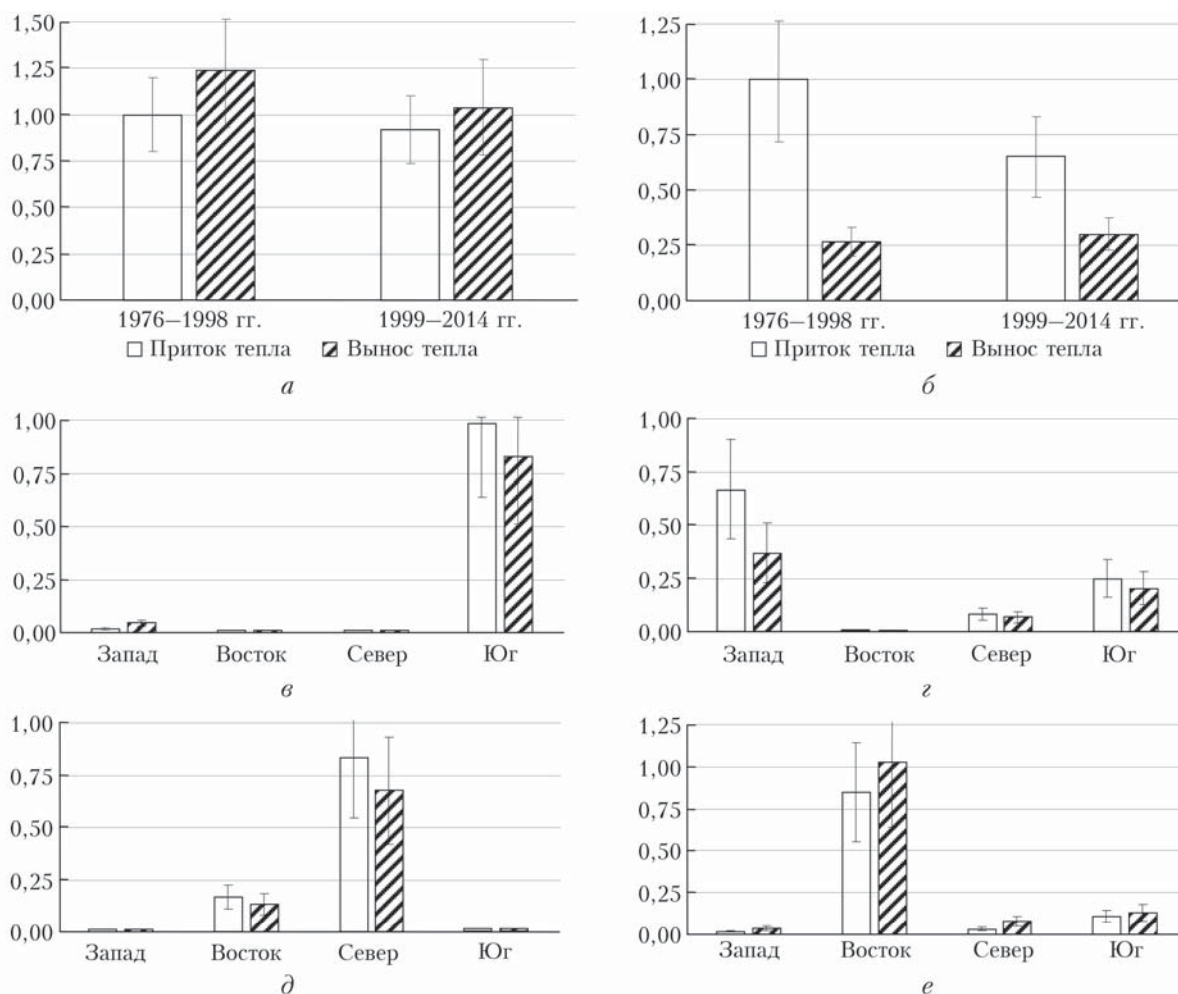


Рис. 4. Баланс адвективных потоков теплых воздушных масс (а), а также распределение по направлениям прихода H_w^{in} (в) и выноса H_w^{out} (д) тепла в январе. То же самое для холодных воздушных масс: баланс H_c^{in} и H_c^{out} (б) и распределения H_c^{in} (з), H_c^{out} (е)

Чтобы оценить влияние адвекции, рассчитывалась ее доля дисперсии в изменчивости температуры и влажности воздуха приземного слоя атмосферы Западной Сибири. Оценка проводилась по коэффициентам детерминации уравнений линейной регрессии. В качестве предикторов использовались нормализованные (с нулевой средней и единичной дисперсией) ряды $H_w^{\text{in}} + H_c^{\text{in}}$ и ΔH . В табл. 3 приведены коэффициенты детерминации (коррекция по [26]) влияния адвективных потоков на изменчивость средней январской температуры.

Таблица 3
Коэффициенты детерминации R^2 температуры воздуха и тепловых потоков в январе на территории Западной Сибири

Потоки тепла	Период		
	1976–1998 гг.	1999–2014 гг.	1976–2014 гг.
$H_w^{\text{in}} + H_c^{\text{in}}$	0,05	0,31	0,17
ΔH	0,13	0,60	0,36

Величины коэффициентов для влажности подобны приведенным оценкам. Из сравнения оценок за два временных интервала можно сделать вывод, что с начала XXI в. роль адвективного переноса в изменчивости температуры на территории Западной Сибири значимо возросла.

Заключение

Проведенные исследования пространственно-временной изменчивости тепловых потоков на границе океан–атмосфера в районе Баренцева моря в 1976–2014 гг. показали, что в большей степени изменчивость потоков тепла в начале XXI в. определяется изменением температуры приземного воздуха и в значительно меньшей степени – температурой поверхности океана. Наиболее интенсивные изменения теплообмена на границе океан–атмосфера отмечаются в последние несколько лет. В начале XXI в. в зимний сезон вынос адвективных потоков осуществляется с восточной границы Баренцева моря, а их приток в Западную Сибирь – через ее северную границу. Однако величина поступившего потока составляет 1% от начального значения. При этом в январе начиная с середины 1990-х гг. наблюдается уменьшение притока холодного воздуха (на ~10%), тогда как поток теплого влажного воздуха увеличился в 2 раза за тот же интервал времени. Аналогичные тенденции сохраняются для июля, однако изменчивость потоков меньше. На территорию Сибири теплые и влажные воздушные массы проходят преимущественно через южную грань (~77%), а холодные и влажные – через западную (~32%).

Результаты проведенного исследования показывают, что роль адвекции в изменении температуры и влажности воздуха в Западной Сибири велика и особенно проявляется в последние годы. Можно предположить, что зимнее похолодание в начале XXI в. в Западной Сибири в большей степени объясняется уменьшением адвекции теплого влажного воздуха, приходящего на южную границу террито-

рии. Влияние же Баренцева моря на эти изменения проявляется опосредованно через изменчивость процессов крупномасштабной циркуляции на сопредельных с регионом территориях как следствие усиленного теплообмена за счет увеличения площади открытой воды.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-60088 мол_а_дк и комплексной ПФИ СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» (проект № 45).

1. Wen X., Tang G., Shaowu Wang J.H. Comparison of global mean temperature series // Adv. Clim. Change Res. 2011. V. 2 (4). P. 187–192.
2. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Колебания и изменения климата на территории России // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39, № 2. С. 166–187.
3. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution 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 and P.M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom, New York, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 pp. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. М.: Росгидромет, 2015. 107 с.
5. Полонский А.Б. Глобальное потепление, крупномасштабные процессы в системе океан–атмосфера, термohальная катастрофа и их влияние на климат Атлантико-Европейского региона // Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины. Сер. Современные проблемы океанологии. 2008. 45 с.
6. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. Т. 6, № 2. С. 66–79.
7. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фунд. и прикл. климатология. 2015. № 1. С. 11–26.
8. Philipona R., Behrens K., Ruckstuhl C. How declining aerosols and rising greenhouse gases forced rapid warming in Europe since the 1980s // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L02806.
9. Семенов В.А., Мохов И.И., Полонский А.Б. Моделирование влияния естественной долгопериодной изменчивости в Северной Атлантике на формирование аномалий климата // Мор. гидрофиз. журн. 2014. № 4. С. 14–27.
10. Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Роль границ морского льда и температуры поверхности океана на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 1–18.
11. Graversen R.G., Mauritsen T., Tjernström M., Källén E., Svensson G. Vertical structure of recent arctic warming // Nature. 2008. V. 451, N 7174. P. 53–56. DOI: 10.1038/nature06502.
12. Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления // Лед и Снег. 2014. Т. 54, № 2. С. 53–68. DOI: 10.15356/2076-6734-2014-2-53-68.
13. Уразильдеева А.В., Русин И.Н. Ледовитость Арктики и перенос водяного пара на Евразию // Актуал. проблемы гуманитар. и естеств. наук. 2015. Т. 7, № 2. С. 16–20.
14. Смирнов А.В., Корблев А.А. Взаимосвязь между характеристиками перемешанного слоя и потоками тепла на границе раздела океан–атмосфера в Северо-Евро-

- пейском бассейне // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. Т. 86, № 3. С. 79–88.
15. *Сорокина С.А., Эзау И.Н.* Меридиональный поток энергии в Арктике по данным архива радиозондирования IGRA // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 45, № 5. С. 622–633.
 16. *Langen P.L., Alexeev V.A.* Polar amplification as a preferred response in an aquaplanet GCM // Clim. Dyn. 2007. V. 29, N 2–3. P. 305–317.
 17. *Boning C.W., Scheinert M., Dengg J., Biastoch A., Funk A.* Decadal variability of subpolar gyre transport and its reverberation in the North Atlantic overturning // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. L21S01. DOI: 10.1029/2006gl026906.
 18. *Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Уразильдеева А.В., Бобылев Л.П.* Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на потепление в Арктике в зимний период // Фунд. и прик. климатология. 2016. № 1. С. 43–63.
 19. *Outten S.D., Esau I.* A link between Arctic sea ice and recent cooling trends over Eurasia // Clim. Change. 2011. V. 110, N 3–4. P. 1069–1075. DOI: 10.1007/s10584-011-0334-z.
 20. *Petoukhov V., Semenov V.* A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // J. Geophys. Res. 2010. V. 115: D21111. DOI: 10.1029/2009JD013568.
 21. *Второй* оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: ФГБУ НИЦ «Планета», 2014. 58 с.
 22. *Kharyutkina E.V., Ippolitov I.I., Loginov S.V.* The variability of radiative balance elements and air temperature over the asian region of Russia // Biogeosciences. 2012. V. 9, № 3. P. 1113–1123.
 23. *Харюткина Е.В., Итолитов И.И., Логинов С.В.* Роль радиационных и циркуляционных факторов в изменении климата Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52, № 6. С. 651–659.
 24. *Харюткина Е.В.* Особенности изменчивости основных климатических характеристик на территории Западной Сибири: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Ин-т оптики атмосфер. им. В.Е. Зуева, 2012. 124 с.
 25. *Будыко М.И.* Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеоздат, 1956. 255 с.
 26. *von Storch H., Zwiers F.W.* Statistical analysis in climate research. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 484 p.

***E.I. Usova, S.V. Loginov, E.V. Kharyutkina.* The influence of heat fluxes in the Barents Sea on the temperature regime of West Siberia in winter season.**

The investigation in spatiotemporal variability of ocean–atmosphere heat fluxes in the area of the Barents Sea was carried out over the period 1976–2014. Seasonal changes in the sea ice cover in the Arctic sector of Siberia was also derived. Sea ice area reduction during last decades in the Arctic basin corresponds to sea surface temperature increase, in contrast to which sensible and latent heat fluxes decrease, which was the most pronounced in January. The most intensive changes in ocean–atmosphere heat exchange in the sea under study were indicated during last several years. In the beginning of XXI century, in winter season, advection from the Barents Sea took place mainly through its east border, and advection to West Siberia, through its north border (1%). However, the contribution of advection to the air temperature and humidity in the region increased over last years. It is supposed, that, first of all, the weakening of heat and moisture advection to West Siberia from its south border played an important role in winter cooling here. The influence of the Barents Sea on heat fluxes changes was indirectly shown through large-scale circulation variability over the adjacent territories, as a consequence of intensified heat exchange due to the increase in the open sea area.