

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНОСОВ ТЕПЛА И ВЛАГИ НА ЛЕТНЕЕ ПОТЕПЛЕНИЕ В АРКТИКЕ

Г.В. АЛЕКСЕЕВ¹, С.И. КУЗЬМИНА², Л.П. БОБЫЛЕВ², А.В. УРАЗГИЛЬДЕЕВА¹,
Н.В. ГНАТЮК²

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: alexgv@aari.ru

² — Фонд Нансен-центр, Санкт-Петербург, e-mail: leonid.bobylev@niersc.spb.ru

Существуют разные точки зрения на роль атмосферных притоков тепла и влаги в усилении летнего потепления в Арктике, которые часто основаны на анализе среднегодовых данных. В данной работе проведен анализ летних атмосферных переносов, их влияния на температуру воздуха и содержание водяного пара в атмосфере, тенденций многолетних изменений переносов, отмечена важная роль притоков влаги из Северного Ледовитого океана в летний сезон и их влияние на рост нисходящей длинноволновой радиации и усиление сокращения площади льда.

Ключевые слова: Арктика, летнее потепление, атмосферные переносы, водяной пар, морской лед.

ВВЕДЕНИЕ

Потепление в Арктике имеет ярко выраженный сезонный ход с максимумом осенью/зимой и минимумом летом (Алексеев и др., 2010; Bekryaev et al., 2010; Screen et al., 2012; Sejas et al., 2014) и сопровождается интенсификацией арктической ветви глобального гидрологического цикла (Rawlins et al., 2010; Bengtsson et al., 2011). Однако относительно причин и вклада разных факторов в современное усиление летнего потепления результаты исследований расходятся. Особенно противоречивы выводы о роли летних притоков тепла и влаги из низких широт в Арктику в усилении потепления и интенсификации гидрологического цикла. Увеличение атмосферного притока тепла и влаги зимой в 1979–2014 гг. и его влияние на потепление в Арктике было показано в работе (Алексеев и др., 2016).

Исследование гидрологического цикла в полярных районах при продолжающемся потеплении по данным реанализа ERA/Interim и моделирования на глобальной модели климата ECHAM5 современного и будущего климата (Bengtsson et al., 2011) показало, что осадки и горизонтальный перенос влаги в Арктику (севернее 60° с.ш.) максимальны в августе и сентябре, а испарение — в июне и июле. Наибольший приток влаги отмечается в районах основных путей циклонов в Арктику на востоке Северной Атлантики и Тихого океана, а в расчетах на модели по сценарию A1B перенос влаги в Арктику в конце XXI в. возрастает на 29 %.

Авторы работы (Bintanja, Selten, 2014) полагают, что значительное увеличение осадков в Арктике по проекциям глобальных моделей на конец XXI в., приписываемое росту притока влаги в Арктику, имеет причиной рост испарения с максимумом зимой

и, в меньшей степени, приток влаги из низких широт. Рост испарения происходит вследствие сокращения площади льда зимой. Ранее авторы работы (Boisvert et al., 2013), оценивая потоки влаги с поверхности по данным спутника NASA Aqua, нашли в средних по Арктике величинах значительные межгодовые колебания и статистически значимые отрицательные тренды потоков с поверхности в декабре, январе и феврале за 2003–2011 гг. вследствие увеличения удельной влажности на высоте 2 м, уменьшающей разность с влажностью у поверхности, а в работе (Serreze et al., 2012) установлен наибольший рост содержания влаги в атмосфере Арктики летом и в начале осени.

В работе (Dufour et al., 2016) предпринято исследование интенсификации гидрологического цикла в Арктике при потеплении с особым вниманием к поступлению водяного пара из низких широт с учетом сезонного цикла. Авторы пришли к выводу, что максимум поступления влаги из низких широт приходится на летний сезон. В межгодовой изменчивости средних за год притоков обнаружено десятилетнее снижение с 1989 г. и отсутствие значимых трендов за 1979–2013 гг. С другой стороны, содержание влаги в атмосфере нарастало, и в этом авторы видят аргумент против усиления притока водяного пара в Арктику извне при потеплении климата в пользу усиления роли испарения в интенсификации арктического гидрологического цикла. Дополнительный довод в пользу такого заключения они находят в отсутствии корреляции между содержанием водяного пара в нижней тропосфере и меридиональной составляющей ветра.

Авторы работы (Sejas et al., 2014) считают, что меньшее по сравнению с зимой потепление летом связано с противоположным характером обратной связи коротковолновой и длинноволновой радиации с облачностью и альбедо и с притоком тепла в океан. Осенью и зимой океан отдает летнее тепло, что вместе с положительной обратной связью длинноволновой радиации и облачности усиливает потепление. Однако в таком объяснении не учитывается вклад меридионального атмосферного переноса тепла в тепловой баланс Арктики.

В рассмотренных исследованиях высказываются разные точки зрения на роль атмосферных притоков тепла и влаги в Арктику в усилении потепления, которые часто основаны на анализе среднегодовых данных. В данной работе проведен сравнительный анализ зимних и летних атмосферных переносов, их влияния на температуру воздуха и содержание водяного пара в атмосфере, тенденций многолетних изменений переносов, отмечена важная роль притоков влаги с поверхности Северного Ледовитого океана в атмосферу летом и их влияние на рост нисходящей длинноволновой радиации и усиление сокращения площади льда.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использованы данные реанализа ERA/Interim (Dee et al., 2011) за 1979–2016 гг., содержащие характеристики термодинамического состояния глобальной атмосферы с высоким разрешением по времени и пространству, а также интегральные (по вертикали от поверхности до уровня 10 мб) оценки переносов тепла и влаги в направлении полюсов. В работе использовались среднемесячные данные из области от 70 до 90° с.ш., включавшие среднемесячные значения температуры воздуха, содержания водяного пара, меридиональной составляющей скорости ветра в узлах регулярной сетки с разрешением 1° по долготе и 0,25° по широте на изобарических поверхностях от 1000 до 100 гПа с дискретностью 50 гПа. Также были использованы оценки интегральных (полных) меридиональных переносов тепла и влаги через

единичную вертикаль от поверхности до 10 гПа и интегральное от поверхности до 10 гПа содержание водяного пара в каждом узле сетки.

Данные о среднемесечной площади морского льда в Северном Ледовитом океане (СЛО) взяты на сайте <http://www.aari.ru/datasets>, данные о среднемесечной площади морского льда в арктических морях подготовлены в отделе ледового режима и прогнозов ААНИИ.

Для количественной оценки взаимосвязи различных факторов и их влияния на температуру воздуха и содержание водяного пара использован многомерный взаимно-корреляционный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Летние переносы тепла и влаги и их влияние на потепление будем рассматривать в сравнении с зимними процессами. На рис. 1 показаны вертикальные распределения средних за лето (июнь–август) и зиму (декабрь–февраль) температуры, содержания водяного пара в области 70–90° с.ш. и меридиональной составляющей скорости ветра на 70° с.ш., осредненной по всему широтному кругу (0–360°), по атлантической (0–80° в.д.) и тихоокеанской (200–230° в.д.) его частям. Эти части, названные атлантическими и тихоокеанскими «воротами» для притоков тепла и влаги в Арктику, были выделены в статье (Алексеев и др., 2016) для зимних переносов через 70° с.ш.

На рисунке хорошо видно летнее повышение температуры воздуха во всей толще тропосферы, 4–5-кратный рост содержания водяного пара в нижней ее части и перестройка полярной ячейки меридиональной циркуляции от зимы к лету с изменением направления переносов, более всего заметная в атлантической части. Летом меридиональная составляющая ветра направлена из Арктики в нижнем слое тропосферы до уровня 700 гПа в среднем по всему широтному кругу и через его атлантическую часть. Выше направление меняется на противоположное — в Арктику. Через тихоокеанскую часть 70° с.ш. меридиональная составляющая ветра направлена в Арктику практически во всей тропосфере за исключением приповерхностного слоя ниже 925 гПа.

Направление меридиональной составляющей среднего ветра определяет и направление переносов явного и скрытого (водяного пара) тепла (рис. 2).

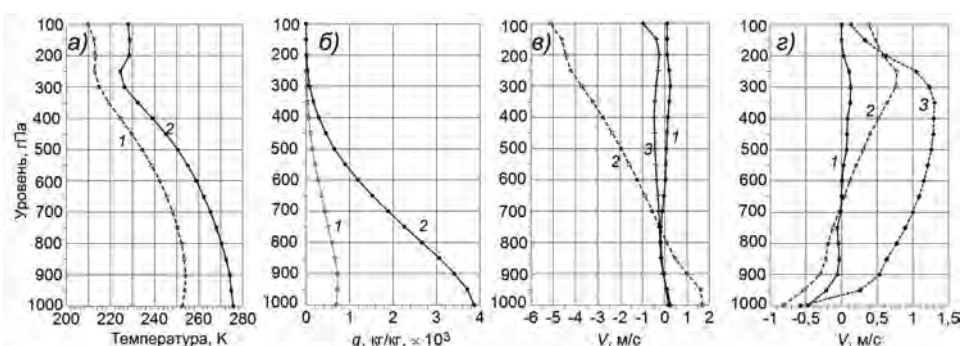


Рис. 1. Вертикальные профили температуры воздуха, содержания водяного пара и меридиональной составляющей скорости ветра в Арктике.

a — вертикальные профили температуры воздуха и *б* — содержания водяного пара, средние по области 70–90° с.ш. зимой (1) и летом (2); *в* — меридиональная составляющая ветра зимой, *г* — летом, осредненная вдоль 70° с.ш. (0–360°, (1)), (0–80° в.д., (2)), (200–230° в.д. (3)).

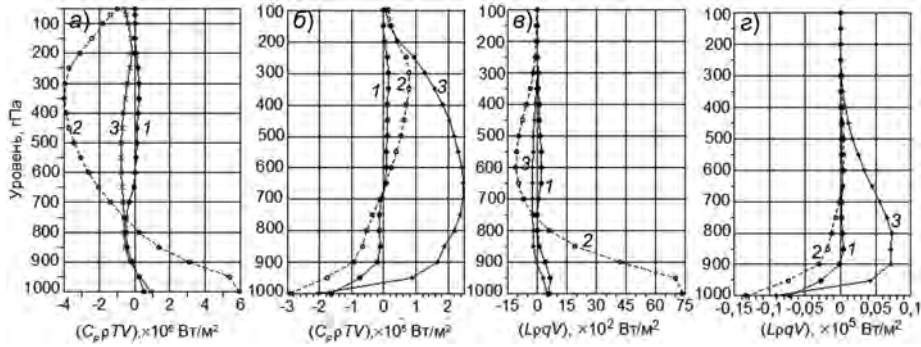


Рис. 2. Вертикальные профили средних меридиональных переносов явного и скрытого тепла через 70° с.ш.

1 — средний перенос через весь круг широты, 2 — перенос через атлантическую часть (0–80° в.д.), 3 — перенос через тихоокеанскую часть (200–230° в.д.); а, в — переносы зимой явного (а) и скрытого (в) тепла; б, з — переносы летом явного (б) и скрытого (з) тепла.

Из рисунка видно, что летом в нижнем слое тропосферы преобладает вынос явного тепла и скрытого (т.е. водяного пара) тепла из Арктики в целом через 70° с.ш. и, в большей степени, через ее атлантическую часть. Основной приток тепла и влаги в Арктику в этот период осуществляется через тихоокеанскую часть этого широтного круга во всей тропосфере за исключением приповерхностной части. Последнее согласуется с выводами работы (Lee et al., 2017), в которой рост атмосферного переноса

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между средними за лето притоками явного ($C_p\rho TV$) и скрытого ($L\rho qV$) тепла через 70° с.ш. (0–360°), атлантические (0–80° в.д.), тихоокеанские (200–230° в.д.) «ворота» и средней температурой воздуха в области 70–90° с.ш. летом за период 1979–2014 гг.

Уровни, гПа	$C_p\rho TV$			$L\rho qV$		
	0–360°	0–80°	200–230°	0–360°	0–80°	200–230°
1000	-0,05	-0,17	-0,27	-0,34	-0,26	-0,3
950	-0,03	-0,32	-0,19	-0,34	-0,38	-0,14
900	-0,26	-0,33	-0,3	-0,57	-0,35	-0,24
850	-0,13	-0,31	-0,36	-0,32	-0,32	-0,32
800	-0,06	-0,3	-0,38	-0,14	-0,31	-0,35
750	0,09	-0,26	-0,37	-0,06	-0,2	-0,34
700	0,15	-0,02	-0,15	-0,12	-0,05	-0,1
650	0,37	-0,16	-0,28	0,2	-0,16	-0,24
600	0,33	-0,13	-0,25	0,16	-0,14	-0,22
550	0,11	-0,11	-0,21	0,14	-0,12	-0,18
500	-0,02	-0,07	-0,17	0,13	-0,08	-0,15
450	0,08	-0,05	-0,16	0,2	-0,05	-0,15
400	0,23	-0,04	-0,14	0,27	-0,05	-0,13
350	0,10	-0,11	-0,1	0,3	-0,11	-0,1
300	0,30	-0,21	0,09	-0,01	-0,18	0,08
250	0,32	-0,15	0,25	-0,46	-0,15	0,24

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые (на 95-процентном уровне) коэффициенты.

влаги из северной части Тихого океана в Арктику с 2002 г. считается причиной увеличения влагосодержания в атмосфере, которое влияет на рост нисходящей длинноволновой радиации, способствующий сокращению площади льда. Рассмотрим влияние притоков тепла и влаги через 70° с.ш. на летние температуру воздуха и содержание водяного пара в области $70\text{--}90^\circ$ с.ш. В табл. 1 приведены коэффициенты корреляции между притоками и средней температурой на разных уровнях тропосферы.

На основании данных в таблице можно сделать вывод об отсутствии значимого влияния летних атмосферных переносов явного тепла через 70° с.ш. на летнюю температуру практически во всей тропосфере области $70\text{--}90^\circ$ с.ш. Смена знака корреляции между средними по кругу широты переносами и температурой воздуха отражает смену направления переносов из Арктики на нижних уровнях до $750\text{--}700$ гПа на противоположное в Арктику выше 750 гПа со значимым влиянием поступления явного тепла на температуру на уровне $650\text{--}600$ гПа. Отрицательные значимые корреляции на нижних уровнях между переносами водяного пара и температурой (рис. 3), объясняются тем, что при повышении температуры воздуха в области $70\text{--}90^\circ$ с.ш. растет содержание водяного пара, выносимого направленной из Арктики меридиональной составляющей ветра, которая также увеличивается (рис. 4).

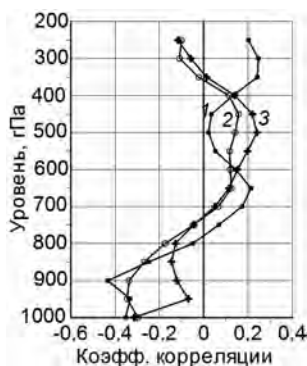


Рис. 3. Коэффициенты корреляции между переносами водяного пара через 70° с.ш. и средней температурой воздуха в области $70\text{--}90^\circ$ с.ш. на различных уровнях летом.

1 — средний перенос через полный круг широты, 2 — перенос через атлантические «ворота» ($0\text{--}80^\circ$ в.д.), 3 — через тихоокеанские «ворота» ($200\text{--}230^\circ$ в.д.). Уровень 95-процентной значимости коэффициентов $\pm 0,32$.

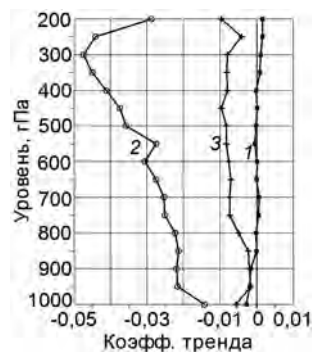


Рис. 4. Линейные тренды меридиональной составляющей ветра летом на разных уровнях на 70° с.ш.

1 — средняя по всему кругу ($0\text{--}360^\circ$), 2 — по атлантической части ($0\text{--}80^\circ$ в.д.), 3 — по тихоокеанской части ($200\text{--}230^\circ$ в.д.). Значимы тренды (2), за исключением уровней 1000 и 200 гПа. Коэффициенты тренда (1) на 95-процентном уровне значимы ниже 700 и выше 350 гПа, коэффициенты (2) значимы на всех уровнях, коэффициенты (3) не значимы.

Тренды многолетних изменений за $1979\text{--}2014$ гг. меридиональной составляющей ветра на 70° с.ш. на рис. 4 указывают на значимый рост средней по всему широтному кругу составляющей, направленной из Арктики в нижнем слое до 700 гПа и направленной в Арктику выше 350 гПа. Средняя по атлантической части $0\text{--}80^\circ$ в.д. составляющая, направленная из Арктики во всем рассматриваемом слое тропосферы, значимо возрастает на всех уровнях, а средняя по тихоокеанской части $200\text{--}230^\circ$ в.д. составляющая, направленная в Арктику, убывает, но с незначимым коэффициентом тренда.

Распределение трендов переносов явного и скрытого тепла имеет подобный рис. 4 вид. Переносы явного и скрытого тепла через эти атлантические «ворота», направленные из Арктики на нижних уровнях (до 700 гПа), возрастают, а направленные в Арктику убывают. В среднем по кругу широты потоки из Арктики на нижних уровнях также растут, как и направленные в Арктику в верхнем слое выше 600 гПа. Направленные в Арктику переносы через 200–230° в.д. (тихоокеанские «ворота») по знаку трендов на всех уровнях убывают, что при положительных трендах температуры и определяет отрицательную корреляцию. Заметим, что за 2002–2014 гг. тренды переносов положительны, как и было найдено в работе (Leea et al., 2017). Средние за 1979–2014 гг. переносы через атлантические «ворота», направленные из Арктики, наоборот, возрастают, что согласуется с увеличением повторяемости прохладных и влажных летних сезонов в Европейской части России в последние годы. Основные притоки в Арктику согласно распределению меридиональной составляющей ветра в летний сезон (см. рис. 5 цвет. вклейки) направлены через 80–140° в.д., 180–220° в.д. и 300–340° в.д.

В связях между многолетними изменениями интегральных атмосферных переносов водяного пара через 70° с.ш., содержания водяного пара, приповерхностной температуры воздуха, облачности, осредненными в области 70–90° с.ш., прослеживается сезонность, за исключением связи между содержанием водяного пара и приповерхностной температурой воздуха (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что межгодовые колебания интегрального содержания водяного пара в атмосфере и приповерхностной температуры воздуха, осредненные в области 70–90° с.ш., тесно связаны во все месяцы года. При том, что приток водяного пара в эту область через 70° с.ш. значимо влияет на содержание водяного пара и на температуру воздуха лишь в холодную часть года. Это указывает на то, что летом действуют главным образом внутренние источники водяного пара — испарение с

Таблица 2

Корреляции между интегральными среднемесячными значениями содержания водяного пара (СВП), интегрального переноса водяного пара (ПВП) и явного тепла (ПЯТ) через 70° с.ш., приповерхностной температурой воздуха (ПТВ), параметрами облачности (облачность среднего яруса (ОСЯ), содержание замерзшей воды (СЗВ)) в области 70–90° с.ш. за 1979–2014 гг.

Месяцы	СВП/ПТВ	ПВП/СВП	ПВП/ПТВ	ПВП/ОСЯ	ПВП/СЗВ	ПВП/ПЯТ
Январь	0,89	0,65	0,58	0,67	0,73	0,74
Февраль	0,90	0,66	0,58	0,67	0,67	0,55
Март	0,81	0,55	0,45	0,70	0,62	0,67
Апрель	0,86	0,50	0,56	0,32	0,79	0,56
Май	0,90	0,27	0,34	0,67	0,57	0,44
Июнь	0,76	–0,07	–0,13	0,55	0,64	0,44
Июль	0,81	–0,28	–0,01	0,62	0,50	0,23
Август	0,82	–0,24	–0,10	0,43	0,52	0,29
Сентябрь	0,80	0,19	0,04	0,24	0,29	0,31
Октябрь	0,77	0,46	0,29	–0,31	0,49	0,60
Ноябрь	0,83	0,70	0,58	0,38	0,65	0,72
Декабрь	0,88	0,41	0,29	0,51	0,66	0,42

Примечание. Курсивом выделены незначимые (по 95-процентному критерию) коэффициенты.

поверхности тающих снега и льда и увеличивающихся пространств открытой воды. В то же время годовой ход интегрального переноса через 70°с.ш., как и содержание водяного пара, имеет максимум летом. Если содержание водяного пара летом растет в нижнем слое, то приток водяного пара летом происходит в верхних слоях, где водяной пар превращается в ледяные кристаллы, формирующие облака среднего яруса. Это подтверждается корреляциями между притоком водяного пара, облачностью, состоящей преимущественно из ледяных кристаллов. Поэтому летний перенос не влияет на интегральное содержание водяного пара и приповерхностную температуру воздуха.

Многолетние изменения общего содержания водяного пара в арктической атмосфере показывают рост во все месяцы года (табл. 3) с максимальным трендом в августе, в то время как перенос водяного пара через 70°с.ш. в летние месяцы не увеличивается. Значимый рост переноса отмечается лишь в ноябре–январе.

Таблица 3

Тренды интегрального содержания и переноса водяного пара (СВП, кг·м⁻²·год⁻¹; ПВП, кг·м⁻¹·с⁻¹·год⁻¹) в область 70–90°с.ш. и площади льда в Северном Ледовитом океане (ПМЛ, 10³км²·год⁻¹) за 1979–2014 гг.

Тренды	Месяцы					
	I	II	III	IV	V	VI
СВП	0,011	0,005	0,004	0,014	0,018	0,027
ПВП	0,022	-0,013	0,004	0,020	0,012	0,007
ПМЛ	-25,4	-23,45	-18,58	-17,84	-21,07	-39,34

Тренды	Месяцы						Год
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
СВП	0,028	0,037	0,022	0,016	0,014	0,013	0,017
ПВП	-0,016	-0,001	-0,010	-0,002	0,046	0,021	0,009
ПМЛ	-64,3	-71,89	-84,87	-75,05	-42,46	-30,29	-42,88

Примечание. Значимые тренды выделены жирным шрифтом.

Таблица 4

Корреляция между среднемесячными значениями площади морского льда в Северном Ледовитом океане, интегрального содержания водяного пара (СВП) и нисходящей длинноволновой радиации у поверхности (ДВР) в области 70–90°с.ш. в разные месяцы за 1979–2014 гг.

Месяцы	СВП	ДВР
Январь	-0,60	-0,65
Февраль	-0,53	-0,59
Март	-0,28	-0,44
Апрель	-0,53	-0,62
Май	-0,47	-0,53
Июнь	-0,66	-0,57
Июль	-0,69	-0,82
Август	-0,63	-0,73
Сентябрь	-0,59	-0,82
Октябрь	-0,50	-0,75
Ноябрь	-0,49	-0,71
Декабрь	-0,68	-0,72

На летние месяцы приходится ускоренное сокращение площади морского льда, влияющее на увеличение содержания водяного пара в летние месяцы и, как следствие, нисходящей длинноволновой радиации (табл. 4).

Как отмечалось выше, переносы водяного пара через 70° с.ш. летом практически не влияют на содержание водяного пара и, следовательно, на нисходящую длинноволновую радиацию, которая тесно связана с содержанием водяного пара (табл. 5).

Таблица 5

Корреляция между интегральным содержанием водяного пара в атмосфере (СВП) и нисходящей длинноволновой радиацией (ДВР) на поверхности в области 70–90° с.ш. в летние месяцы

ДВР	СВП			
	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Июнь	0,88	0,57	0,49	0,32
Июль	0,70	0,77	0,60	0,59
Август	0,64	0,78	0,94	0,53
Сентябрь	0,63	0,69	0,72	0,89

Исходя из предположения, подтверждаемого данными табл. 4, что летнее сокращение площади льда ведет к росту содержания водяного пара и нисходящей длинноволновой радиации, можно оценить обратное влияние этого процесса на усиление сокращения площади льда по формуле, полученной в линейном приближении зависимостей между S , R , Q :

$$\Delta S_R = \rho_{SR} \frac{\sigma_S}{\sigma_R} \cdot \rho_{RQ} \frac{\sigma_R}{\sigma_Q} \cdot \rho_{QS} \frac{\sigma_Q}{\sigma_S} \Delta S,$$

откуда получаем

$$\frac{\Delta S_R}{\Delta S} = \rho_{SR} \cdot \rho_{QR} \cdot \rho_{SQ},$$

где ρ — коэффициенты корреляции между площадью льда S , нисходящей длинноволновой радиацией на поверхности R , осредненной по области 70–90° с.ш., интегральным содержанием водяного пара в столбе атмосферы Q , осредненным по области 70–90° с.ш. Значения коэффициентов ρ даны в табл. 4 и 5.

Формула получена в предположении, что источником водяного пара в атмосфере к северу от 70° с.ш. является открытая вода при повышающейся температуре воздуха. Приток водяного пара летом через 70° с.ш. или ее части, как следует из табл. 2, не влияет на интегральное содержание водяного пара и ДВР. Результаты расчетов по формуле приведены в табл. 6.

Таблица 6

Относительная часть аномалии площади льда в Северном Ледовитом океане, связанная с усилением/ослаблением сокращения площади за счет обратной связи «сокращение площади – рост содержания водяного пара – увеличение нисходящей ДВР – сокращение площади» в период таяния льда с июня по сентябрь

в Северном Ледовитом океане (СЛО) и в сибирских арктических морях (САМ: Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское моря)

Регион	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
СЛО	0,33	0,44	0,43	0,43
САМ	0,35	0,28	0,28	0,26

Данные таблицы показывают, что сокращение площади льда летом самоускоряет процесс летнего очищения СЛО от льда: при появлении пространств открытой воды растет содержание водяного пара, увеличивающего приток нисходящей длинноволновой радиации, в результате ускоряется таяние льда как в СЛО, так и в сибирских арктических морях.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Выполнен сравнительный анализ зимних и летних атмосферных переносов, их влияния на температуру воздуха и содержание водяного пара в атмосфере, тенденций многолетних изменений переносов, отмечена важная роль притоков влаги из Северного Ледовитого океана в летний сезон и их влияние на рост нисходящей длинноволновой радиации, приводящий к ускорению сокращения площади льда.

Отмечены летнее повышение температуры воздуха во всей толще тропосферы, 4–5-кратный рост содержания водяного пара в нижней ее части и перестройка полярной ячейки меридиональной циркуляции от зимы к лету с изменением направления переносов через 70° с.ш., более всего заметная в атлантической части широтного круга от 0 до 80° в.д. Летом меридиональная составляющая ветра направлена из Арктики в нижнем слое тропосферы до уровня 700 гПа в среднем по всему широтному кругу и через его атлантическую часть. Выше направление меняется на противоположное — в Арктику.

Направление меридиональной составляющей среднего ветра определяет и направление переносов явного и скрытого (водяного пара) тепла. Летом в нижнем слое тропосферы преобладает вынос явного тепла и скрытого (т.е. водяного пара) тепла из Арктики в целом через 70° с.ш. и, в большей степени, через ее атлантическую часть. Основной приток тепла и влаги в Арктику в этот период осуществляется через тихоокеанскую часть этого широтного круга во всей тропосфере за исключением приповерхностной части.

Установлено отсутствие значимого влияния летних атмосферных переносов явного тепла через 70° с.ш. на летнюю температуру практически во всей тропосфере области 70 – 90° с.ш. Смена знака корреляции между средними по кругу широты переносами и температурой воздуха отражает смену направления переносов из Арктики на нижних уровнях до 750 – 700 гПа на противоположное в Арктику выше 750 гПа.

Тренды многолетних изменений за 1979 – 2014 гг. меридиональной составляющей ветра на разных уровнях на 70° с.ш. указывают на значимый рост средней по всему широтному кругу составляющей, направленной из Арктики в нижнем слое до 700 гПа и направленной в Арктику выше 350 гПа. Средняя по атлантической части 0 – 80° в.д. составляющая, направленная из Арктики во всем рассматриваемом слое тропосферы, значимо возрастает на всех уровнях, а средняя по тихоокеанской части 200 – 230° в.д. составляющая, направленная в Арктику, убывает, но с незначимым коэффициентом тренда.

Переносы явного и скрытого тепла через атлантические «ворота», направленные из Арктики на нижних уровнях (до 700 гПа), возрастают, что согласуется с увеличением повторяемости прохладных и влажных летних сезонов в Европейской части России в последние годы. В среднем по 70° с.ш. потоки из Арктики на нижних уровнях также растут, как и направленные в Арктику в верхнем слое выше 600 гПа. Направленные в Арктику переносы через 200 – 230° в.д. (тихоокеанские «ворота») по знаку трендов на всех уровнях убывают, что при положительных трендах температуры и определяет отрицательную корреляцию между атмосферными переносами тепла и температурой.

В связях между многолетними изменениями интегральных атмосферных переносов водяного пара через 70° с.ш., содержания водяного пара, приповерхностной температуры воздуха, облачности, осредненными в области $70\text{--}90^\circ$ с.ш., проявляется сезонность. Однако межгодовые колебания интегрального содержания водяного пара в атмосфере и приповерхностной температуры воздуха, осредненные в области $70\text{--}90^\circ$ с.ш., тесно связаны во все месяцы года. При том, что приток водяного пара в эту область через 70° с.ш. значительно влияет на содержание водяного пара и на температуру воздуха лишь в холодную часть года. Летом содержание водяного пара растет в нижнем слое тропосферы, а приток водяного пара происходит в верхних слоях, где водяной пар превращается в замерзшую воду, которая формирует облака среднего яруса, что подтверждается корреляциями между притоком, облачностью среднего яруса и количеством замерзшей воды.

Многолетние изменения общего содержания водяного пара в арктической атмосфере показывают рост во все месяцы года с максимальным трендом в августе, в то время как перенос водяного пара через 70° с.ш. в летние месяцы не увеличивается, что ранее найдено и в работе (Dufour et al., 2016).

Поскольку летнее сокращение площади льда ведет к росту содержания водяного пара и нисходящей длинноволновой радиации, то оценено обратное влияние этого процесса на усиление сокращения площади льда. Получено, что относительная часть аномалии площади льда в Северном Ледовитом океане, связанная с усилением/ослаблением сокращения площади за счет обратной связи «сокращение площади — рост содержания водяного пара — увеличение нисходящей ДВР — сокращение площади», составляет в летние месяцы (июнь–сентябрь) до 40 %, а в сибирских арктических морях до 30 %. Эти оценки согласуются с полученным ранее в работе (Francis et al., 2005) выводом, что до 40 % межгодовой изменчивости летней площади льда в арктических морях обусловлено влиянием аномалий нисходящей длинноволновой радиации.

Статья подготовлена по результатам проекта РФФИ 15–05–03512. Авторы благодарят В.М. Смоляницкого, А.В. Юлина, Л.П. Мочнову за предоставление данных о площади морских льдов Северного Ледовитого океана и сибирских арктических морей и признательны рецензенту за замечания, способствовавшие устранению неясностей в тексте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г. В., Радионов В. Ф., Александров Е. И., Иванов Н. Е., Харланенкова Н. Е. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 1 (84). С. 67–80.

Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Уразильдеева А. В., Бобылев Л. П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43–63.

Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming // Journal of Climate. 2010. Vol. 23. №. 14. P. 3888–3906.

Bengtsson L., Hodges K. I., Koumoutsaris S., Zahn M., Keenlyside N. The changing atmospheric water cycle in Polar Regions in a warmer climate // Tellus A. 2011. Vol. 63. №. 5. P. 907–920.

Bintanja R., Selten F. Future increases in Arctic precipitation linked to local evaporation and sea-ice retreat // Nature. 2014. Vol. 509. № 7501. P. 479–482.

Boisvert L.N., Markus T., Vihma T. Moisture flux changes and trends for the entire Arctic in 2003–2011 derived from EOS Aqua data // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118. № 10. P. 5829–5843.

Dee D.P. et al. The ERA–Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the royal meteorological society*. 2011. Vol. 137. № 656. P. 553–597.

Dufour A., Zolina O., Gulev S.K. Atmospheric moisture transport to the Arctic: Assessment of reanalyses and analysis of transport components // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29. № 14. P. 5061–5081.

Francis J.A., Hunter E., Key J., Wang X. Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. № 21. doi:10.1029/2005GL024376.

Leea H.J., Kwon M.O., Yeh S.W., Kwon Y.O., Park W., Park J.-H., Kim Y.H., Alexander M.A. Impact of poleward moisture transport from the North Pacific on the acceleration of sea-ice loss in the Arctic since 2002 // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30 (17). P. 6757–6769.

Rawlins M.A. et al. Analysis of the Arctic system for freshwater cycle intensification: Observations and expectations // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23. № 21. P. 5715–5737.

Screen J.A., Deser C., Simmonds I. Local and remote controls on observed Arctic warming // *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39. № 10. L10709, doi:10.1029/2012GL051598.

Sejas S.A., Cai M., Hu A., Meehl G.A., Washington W., Taylor P.C. Individual feedback contributions to the seasonality of surface warming // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. № 14. P. 5653–5669.

Serreze M.C., Barrett A.P., Stroeve J. Recent changes in tropospheric water vapor over the Arctic as assessed from radiosondes and atmospheric reanalyses // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012. Vol. 117. № D10. doi:10.1029/2011JD017421

G.V. ALEKSEEV, S.I. KUZMINA, L.P. BOBILEV, A.V. URAZGILDEEVA, N.V. GNATUK

INFLUENCE OF THE ATMOSPHERIC HEAT AND MOISTURE TRANSPORT ON SUMMER WARMING IN THE ARCTIC

There are different points of view on the role of the atmospheric heat and moisture transport in increasing summer warming in the Arctic, which are often based on the analysis of average annual data. In this paper, the analysis of summer atmospheric transport, their influence on air temperature and water vapor content in the atmosphere, trends in multi-year transport changes are fulfilled. It is noted the important role of moisture inflows from the Arctic Ocean in the summer season and their influence on the growth of long-wave radiation and amplification of sea ice shrinking.

Keywords: Arctic, summer warming, atmospheric transport, water vapor, sea ice.