

А.А. Виноградова

## Изменение режима ветра на Евразийском побережье Северного Ледовитого океана в конце XX в.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 18.01.2006 г.

Проанализирован ветровой режим на условной границе Арктики — на круге  $70^\circ$  с.ш. — в течение 8 лет, с 1997 по 2004 г. Исходными данными являются скорость и направление ветра, определяемые с интервалом 6 ч непрерывно в течение 1 мес как результат реанализа поля ветра (<http://www.arl.noaa.gov>) для января, апреля, июля и октября.

### Введение

Воздухообмен между арктическими и среднеширотными районами — один из важных климатообразующих процессов для всего Северного полушария. Закономерности распределения и вариации меридиональной составляющей ветра на границе Арктики во многом определяют пространственные и временные изменения атмосферных потоков массы, тепла и влаги в Арктику и из нее. А это, в свою очередь, может сказаться на различных свойствах атмосферы и подстилающей поверхности прибрежных районов и морей Северного Ледовитого океана.

Для изучения ветрового режима на условной границе Арктики (на  $70^\circ$  с.ш.) в 1997–2004 гг. использовались исходные значения скорости и направления ветра, которые определялись с интервалом 6 ч непрерывно в течение месяца как результат реанализа поля ветра по данным [1]. Анализировался ветер в точках, расположенных на круге  $70^\circ$  с.ш. с интервалом  $20^\circ$  долготы на высотах от приземного слоя до 9 км (через 1 км). Сезонные различия в процессах переноса воздуха через выбранную границу рассматривались по результатам для 4 мес — январь, апрель, июль и октябрь. В данной работе подробный анализ проведен для евразийской части Арктики — для зоны от  $0$  до  $200^\circ$  в.д. В дальнейшем положительные значения меридиональной скорости и потоков соответствуют распространению воздуха в Арктику, а отрицательные — из нее.

### 1. Режим ветра

На рис. 1 и 2 приведены средние распределения меридиональной составляющей ветра вдоль круга  $70^\circ$  с.ш. в январе и июле за период 1997–2004 гг. в сравнении с 1960–1990 гг. (по данным [2]).

Видно, что изменения значительны, особенно в евразийском секторе. Кроме повышения среднего значения модуля ветра и зимой, и летом, наиболее важным является изменение знака меридионального

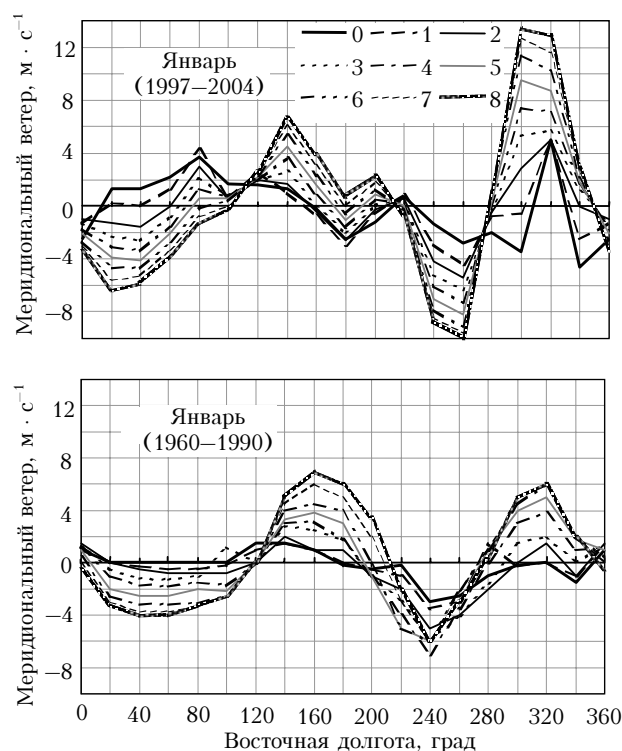


Рис. 1. Среднее распределение меридиональной составляющей скорости ветра для января вдоль круга  $70^\circ$  с.ш. на разных высотах (в легенде — значения высоты в км)

ветра в некоторых областях рассматриваемой территории: для января — появление заноса воздушных масс в Арктику около  $80^\circ$  в.д. и, наоборот, выноса из Арктики около  $180^\circ$  в.д.; для июля — образование еще одной волны в распределении меридионального ветра на высотах выше 2 км в области  $40$ – $140^\circ$  в.д. В целом меридиональная составляющая ветра меняет свой знак вдоль круга  $70^\circ$  с.ш. зимой менее часто, чем летом, что связано с более устойчивыми зимними распределениями давления и температуры во всем регионе. Но в конце XX в.

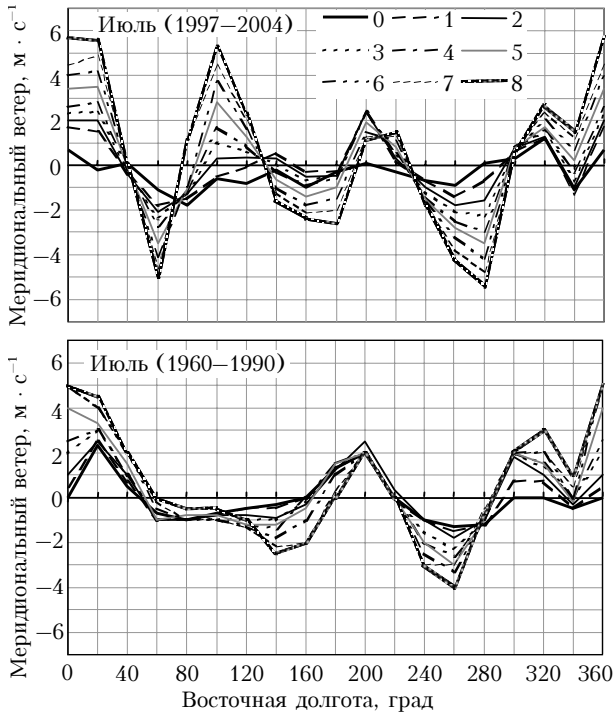


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для июля

число таких смен знака стало больше, что, по-видимому, свидетельствует об ослаблении устойчивости атмосферных режимов в целом.

Рассмотрим более подробно евразийскую часть круга  $70^\circ$  с.ш. Рис. 3 характеризует различия распределений средней (по высоте от 0 до 5 км) величины меридиональной составляющей скорости ветра на рубеже веков и в 1960–1990 гг. (по данным [3]) в разные сезоны.

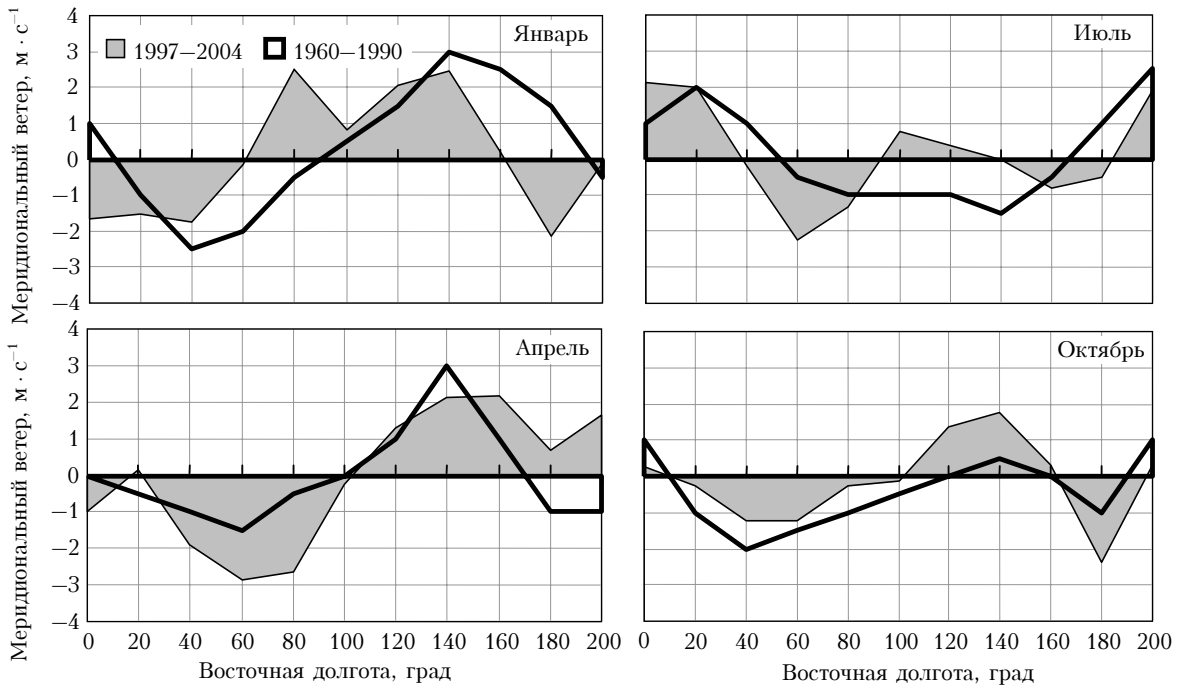


Рис. 3. Сравнение средних распределений (за 1997–2004 и за 1960–1990 гг. [3]) меридиональной составляющей скорости ветра в нижнем слое тропосферы от 0 до 5 км вдоль евразийской части (0–200° в.д.) круга  $70^\circ$  с.ш. для 4 мес

Можно выделить следующие изменения в характере меридионального переноса воздуха в нижней половине тропосферы на побережье Евразии. В январе изменились направления переноса в атлантическом и тихоокеанском секторах (+ на –), а также между  $60$  и  $80^\circ$  в.д. (– на +). Это должно препятствовать поступлению в Арктику теплого воздуха из акваторий Атлантического и Тихого океанов и, наоборот, усилить влияние холодного континентального воздуха из Северной Азии. В апреле также изменились знаки меридиональной скорости в атлантическом и тихоокеанском секторах, но теплый воздух из Тихого океана теперь, наоборот, чаще поступает в Арктику. Кроме того, заметно возросли скорости выноса воздушных масс из Арктики между  $40$  и  $100^\circ$  в.д. В июле, из-за большей дробности распределений вдоль широты (см. рис. 2), изменение направления переноса произошло в трех зонах: в двух узких от  $40$  до  $60^\circ$  в.д. и от  $160$  до  $180^\circ$  в.д. (+ на –), а в широкой зоне  $90$ – $140^\circ$  в.д. – наоборот (– на +). Последнее, по-видимому, означает, что теплый (!) воздух с континента стал поступать в Арктику более эффективно. В октябре характер распределения меридионального ветра над Евразийском побережьем Арктики изменился мало, наиболее заметны увеличение скорости ветра и расширение зоны поступления воздуха в Арктику в области  $100$ – $160^\circ$  в.д.

## 2. Потоки массы

Воздушная масса – это прежде всего масса воздуха, которая переносится в соответствии с направлением ветра. Поскольку плотность воздуха в горизонтальном направлении меняется мало, рис. 3 можно рассматривать и как распределение потоков массы

(в условных единицах) в нижней тропосфере до 5 км на границе Арктики.

Рис. 4 показывает, как распределены меридиональные потоки массы по высоте в тропосфере (в сумме над всей арктической границей Евразии) и как они изменились в конце XX в. При оценках использовались данные из [4] о вертикальном распределении плотности воздуха в разные месяцы. Видно, что в январе в нижних слоях тропосферы происходит, как и раньше, перенос массы в Арктику. Однако в последние годы смена направления переноса происходит ниже — на высоте около 2 км от поверхности (в отличие от 5 км в 1960–1990 гг.). В июле заметные изменения произошли только в приземном слое, где через евразийский участок границы Арктики масса воздуха теперь выносится из Арктического региона.

Для тропосферной компоненты, равномерно распределенной в пределах до 5 км от поверхности на той же мысленно выделенной нами стенке вдоль круга 70° с.ш. от 0 до 200° в.д., соотношения суммарных потоков массы в разные месяцы соответствуют рис. 5. Видно, что в апреле и в июле картинки почти не изменились со временем (при некотором воз-

растании амплитуды колебаний потока в апреле). Зато в январе и в октябре амплитуды изменились слабо, но величины результирующих потоков уменьшились. В конечном итоге, если рассматриваемая равномерно распределенная идеальная компонента еще и не испытывает сезонных вариаций, то суммарные годовые колебания меридионального потока ее массы на границе Евразии практически не изменились к концу XX в. И ее суммарный поток за год через рассматриваемую часть границы Арктики — почти нулевой. Последние два вывода зависят еще и от того, можно ли считать каждый месяц представительным для соответствующего сезона, а сам сезон длящимся 3 мес. Соотношения, представленные на рис. 5, должны быть наиболее близки к реальным для потоков массы воздуха в целом. Однако для других параметров и отдельных составляющих атмосферы все эти допущения едва ли применимы, и по крайней мере внутригодовые колебания концентрации надо учитывать. Поэтому приведенные на рис. 5 грубые оценки никак не претендуют на какую-либо точность, а лишь служат иллюстрацией возможностей дальнейшего развития данного подхода при наличии дополнительной информации.

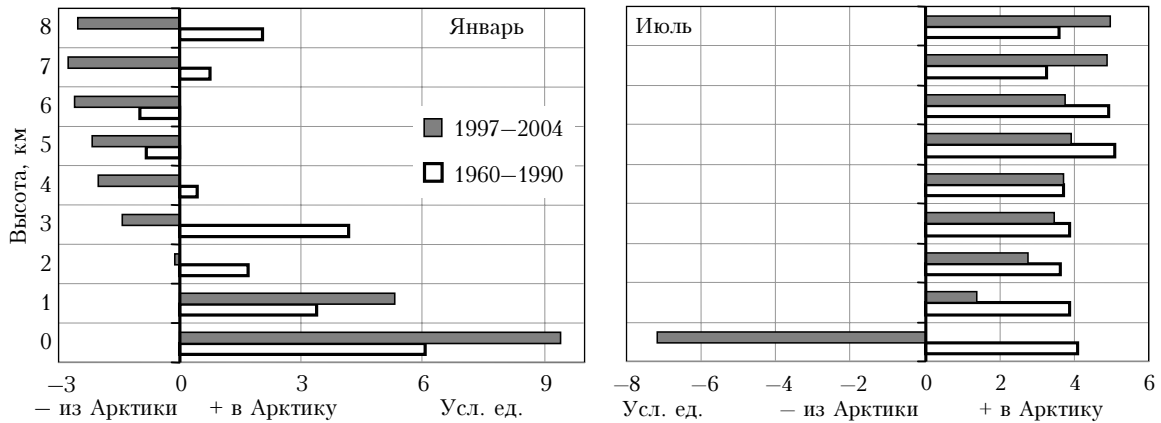


Рис. 4. Сравнение вертикальных распределений (средних за 1997–2004 и за 1960–1990 гг. [3]) меридиональных потоков массы воздуха (суммарных для зоны 0–200° с.ш. вдоль круга 70° с.ш.) в январе и в июле

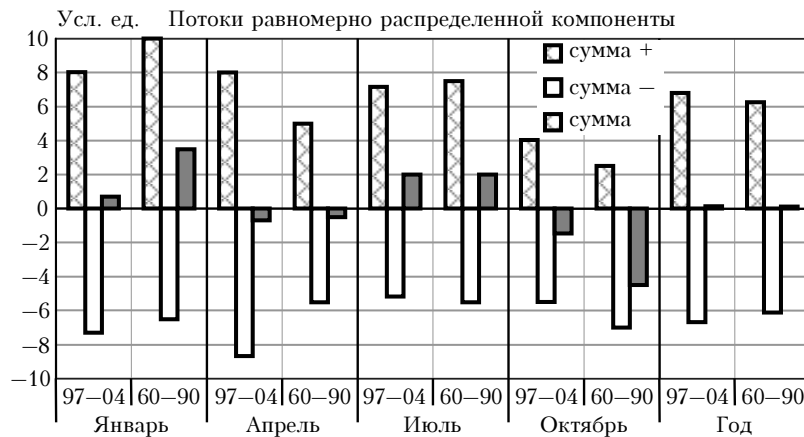


Рис. 5. Суммарные меридиональные потоки в Арктику (+) и из нее (–) атмосферной компоненты, равномерно распределенной на вертикальной стенке высотой 5 км вдоль круга 70° с.ш. в зоне 0–200° в.д., в разные месяцы и за год в целом

### 3. Потоки энергии

Интересно рассмотреть меридиональные потоки кинетической энергии и тепла на рассматриваемом участке границы Арктического региона. Задача оценки и обнаружения территорий, над которыми воздушные массы имеют максимальный ветроэнергетический потенциал, очень важна с практической точки зрения использования ветра как экологически чистого и возобновляемого источника энергии [5]. С другой стороны, потоки тепла в атмосфере — это климатически значимые характеристики, воздействующие на наиболее явный климатический показатель — температуру воздуха того или иного региона.

Если характеризовать кинетическую и тепловую энергии воздушной массы соответственно квадратом модуля скорости ветра и абсолютной температурой, то можно утверждать, что характер распределения средних потоков кинетической энергии и тепла в нижнем слое тропосферы грубо будет определяться меридиональной составляющей ветра вдоль круга 70° с.ш. согласно рис. 3. Это связано с тем, что отклонения величин самих характеристик от их средних значений на порядок меньше последних.

Распределения по вертикали средних (по 1997–2004 гг.) меридиональных потоков кинетической энергии в тропосфере на евразийской части границы Арктики для разных месяцев приведены на рис. 6. К сожалению, сравнить с предыдущими годами, аналогично рис. 4, не удалось, так как в [2] нет исходных данных о значениях модуля скорости ветра. По рис. 6 видно, что почти все время в году во всей

толще тропосферы суммарные потоки кинетической энергии на побережье Евразии соответствуют выносу ветровой энергии из Арктики в средние широты. Сколько-нибудь заметные результирующие потоки противоположного направления наблюдаются только зимой на уровне 925 гПа (700–900 м) и летом выше 850 гПа (выше 1,5 км).

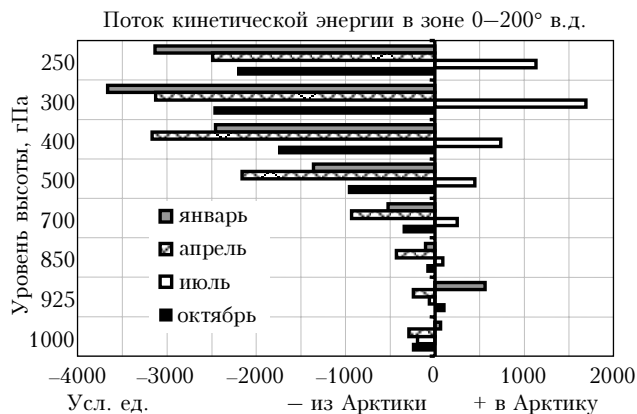


Рис. 6. Вертикальные распределения потока кинетической энергии, суммарного вдоль круга 70° с.ш. в зоне 0–200° в.д., в разные месяцы в среднем за 1997–2004 гг.

Несомненный интерес представляют межгодовые изменения характеристик ветра и потоков массы и энергии в рассматриваемой области. Сравнение распределений меридионального ветра для каждого года (рис. 7) со средним для рассматриваемого 8-летнего периода позволяет для каждого месяца выделить

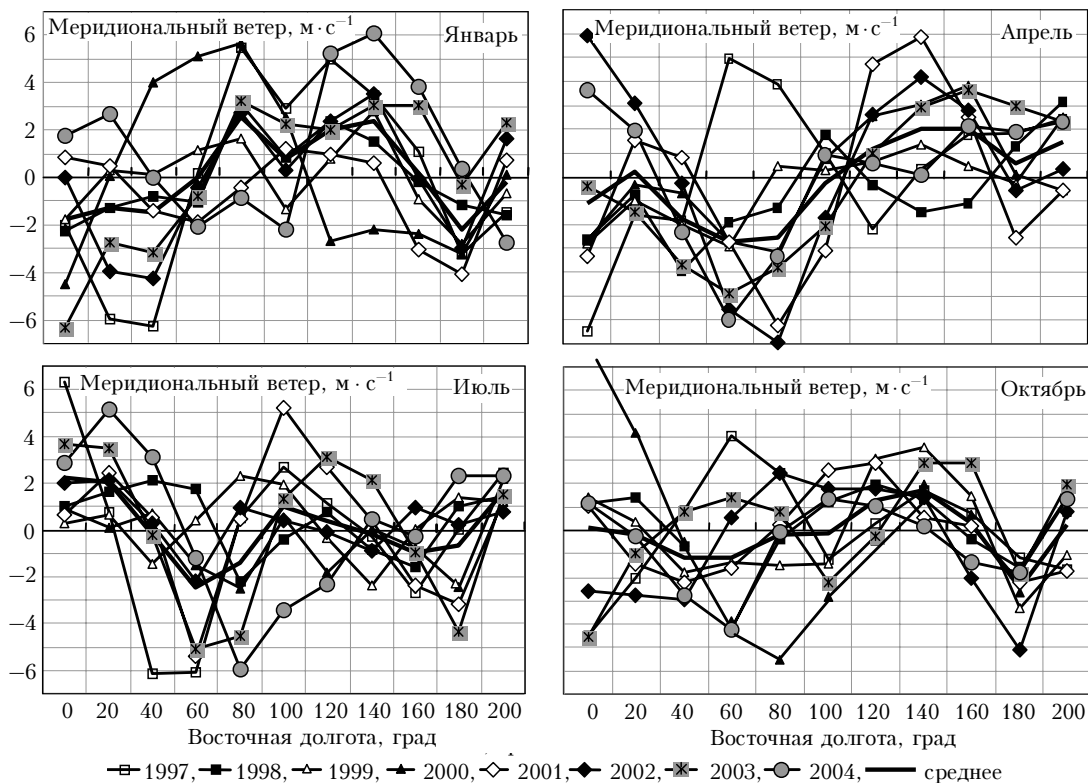


Рис. 7. Межгодовые изменения распределения вдоль круга 70° с.ш. среднемесячной меридиональной составляющей скорости ветра в слое тропосферы от 0 до 5 км для зоны 0–200° в.д. в разные месяцы

аномальные годы. Причем аномалии могут быть как чисто амплитудного характера, так и по знаку скорости, т.е. по направлению переноса воздуха. Все это может оказаться важным для конкретных экспериментальных наблюдений, проводимых вблизи арктического побережья Евразии, и интерпретации их результатов. Для ряда лет отклонения от среднего распределения в европейской части имеют противоположный характер по сравнению с азиатскими районами, что перекликается с данными о регулярно наблюдающейся ледовой оппозиции в западных и восточных арктических морях России [6].

Пространственное распределение приземной температуры воздуха в значительной степени определяется температурой поверхности Земли. Известно, что на высотах около 5 км характер горизонтального распределения температуры воздуха становится близок к зональному [4] и в более высоких слоях определяется солнечным разогревом атмосферы соответствующих широт. Как показывает анализ многолетних данных о температуре воздуха на разных высотах, полученных по результатам реанализа поля температуры [1], эффекты поверхности несколько сглаживаются уже на уровне 850 гПа, но еще просматриваются вполне определенно. Поэтому при оценке средних потоков тепла через рассматриваемую стенку высотой 5 км средней (по вертикали) тепловой характеристикой воздуха мы считали его температуру именно на высоте, соответствующей 850 гПа.

Из рис. 8 видно, что вариации потоков массы и энергии на Евразийском побережье Арктики, как по амплитуде, так и по знаку, от года к году в разные сезоны и за год в целом весьма значительны. Конечно, 8 лет слишком мало, чтобы пытаться сделать какие-либо выводы о долговременных тенденциях в этих изменениях, поэтому положительный линейный тренд среднего за год потока тепла (нижняя диаграмма на рис. 8) нужно трактовать очень осторожно. Достоверность этой аппроксимации мала — всего  $R^2 = 0,16$ , да еще накладывается неопределенность из-за допущения равенства всех сезонов и присвоения каждому из них результатов, полученных для 1 мес.

Конечно, горизонтальный перенос тепла на границе Арктики — не единственный процесс, регулирующий температуру окружающей среды в регионе. И все же несомненно, что в областях, близко расположенных непосредственно к этой границе, именно теплые или холодные воздушные потоки определяют межгодовые различия условий, наблюдаемых при экспериментальных работах. Например, более теплые осенние месяцы в 2003 г., чем в 2002, в Восточно-Сибирском и Чукотском морях, отмеченные в [7], согласуются с нижней диаграммой (рис. 8) и с распределением меридионального ветра осенью (см. рис. 7).

В работе [6] чисто статистически (без анализа механизмов связи) показана корреляция барических распределений в арктическом воздушном бассейне и наличия/отсутствия ледовой оппозиции с характеристиками солнечных циклов, что говорит о сложной и еще до конца не понятой природе этих явлений.

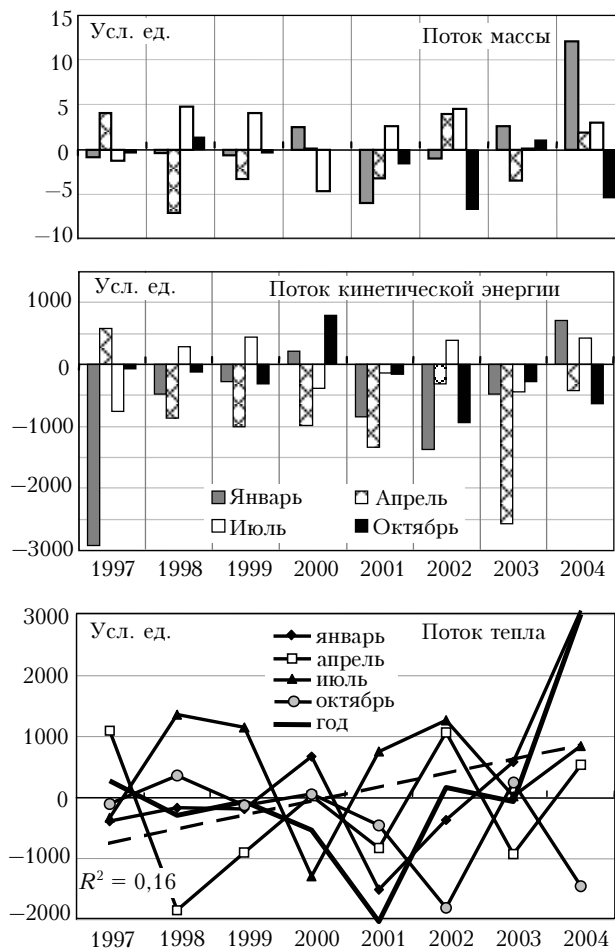


Рис. 8. Межгодовые вариации суммарных меридиональных потоков массы, кинетической энергии и тепла в нижнем слое тропосферы 0–5 км вдоль круга 70° с.ш. в зоне 0–200° в.д. в разные месяцы и за год в целом (для потока тепла). Пунктир на нижней диаграмме — линейный тренд годового потока тепла

Поскольку ветер в значительной степени определяется именно полем атмосферного давления, пространственные распределения ветра (см. рис. 1–3, 7) носят противоположный характер в отношении евразийских и азиатских территорий вблизи 70°-й широты. Если рассмотреть отдельно потоки тепла через европейскую (от 40 до 80° в.д.) и азиатскую (от 120 до 160° в.д.) части нашей мысленной границы на круге 70° с.ш. (рис. 9), становится ясно, что в целом за год по отношению к Арктическому региону они представляют собой области выхода (над Европейским побережьем) и поступления (над Азиатским) тепла.

Причем в разные сезоны эффекты различны, а коэффициент корреляции европейских и азиатских показателей (всего по 8 парам значений за 8 лет) наиболее значим зимой (–0,69), близок к –0,5 весной и летом и совсем мал осенью. И все же тренды суммарного потока тепла за год (см. рис. 9) имеют довольно высокую достоверность, доказывая, что на рубеже XX и XXI вв. выделенные области действительно являлись зонами поступления в Арктику

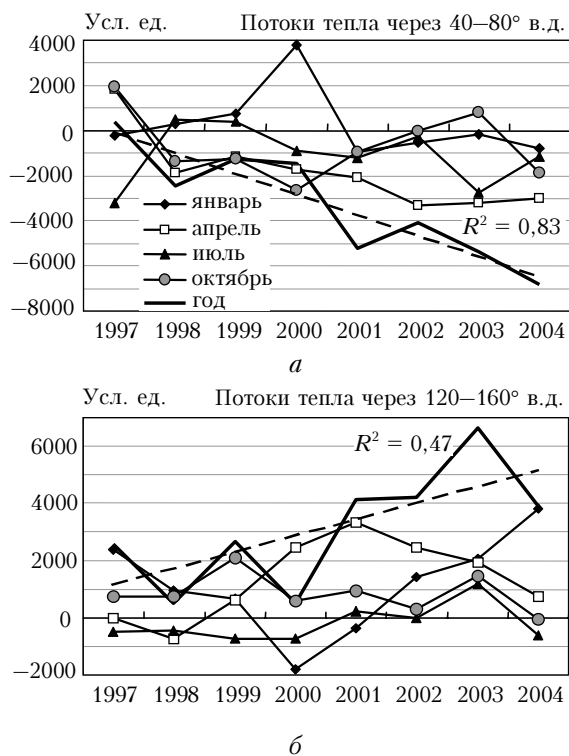


Рис. 9. Межгодовые вариации суммарных меридиональных потоков тепла в слое тропосферы 0–5 км вдоль круга 70° с.ш. в европейской (а) и азиатской (б) зонах в разные месяцы и за год в целом

и выноса из нее тепловой энергии. И в последние годы потоки тепла через эти зоны растут, особенно явно в европейской и менее устойчиво в азиатской части.

### Заключение

Таким образом, анализ ветрового режима на границе Арктики на рубеже XX и XXI вв. показал значительные изменения условий меридионального переноса воздуха между арктическими и среднеширотными районами. Особенно заметные изменения

в конце XX в. по сравнению с 1960–1990-ми гг. произошли на Евразийском побережье Северного Ледовитого океана. Эти изменения проявились как на уровне средних месячных (сезонных) характеристик, так и в их вертикальных и горизонтальных распределениях. Межгодовые вариации ветрового режима в нижнем слое тропосферы в европейской и азиатской частях побережья Евразии часто имеют противоположный характер. В результате через эти зоны происходят, соответственно, вынос и, наоборот, поступление (в сумме за год) тепла в Арктический регион. Эти процессы важны также с точки зрения поступления антропогенных примесей в атмосферу над Северным Ледовитым океаном, ее очищения и перераспределения загрязнений в Северном полушарии. Современные распределения меридиональных потоков массы и энергии на евразийской границе Арктики могут служить дополнительной информацией при интерпретации результатов различных природных наблюдений в арктических районах.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-05-65137).

1. <http://www.arl.noaa.gov>
2. Бурова Л.П., Лукьянчикова Н.И. Роль меридионального воздухообмена в загрязнении и самоочищении атмосферы Арктики // Тр. ГИЦ РФ ААНИИ. СПб.: Гидрометеопиздат, 1998. Т. 439. С. 111–123.
3. Виноградова А.А., Бурова Л.П. О механизмах очищения арктической атмосферы // Докл. РАН. 2001. Т. 379. № 3. С. 377–380.
4. Атмосфера: Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеопиздат, 1991. 509 с.
5. Прахов А.Н. Ветроэнергетические ресурсы Российской Арктики // Тр. ГИЦ РФ ААНИИ. СПб.: Гидрометеопиздат, 1998. Т. 439. С. 50–63.
6. Егоров А.Г. Солнечно обусловленные барические колебания в Арктике и многолетняя повторяемость ледовой опозиции в арктических морях России // Докл. РАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 242–247.
7. Kukla G. Central Arctic: battleground of natural and man-made climate forcing // EOS. 2004. V. 85. N 20. P. 200–201.

*A.A. Vinogradova. Wind pattern variation at the Eurasian coast of the Arctic Ocean at the close of the 1900<sup>th</sup>.*

In the work the wind pattern at the mental border of the Arctic – latitude of 70° N – was studied during the last 8 years from 1997 to 2004. The initial data were the wind direction and speed calculated by reanalysis from (<http://www.arl.noaa.gov>) at 6-hour intervals permanently during a month for January, April, July, and October.