

А. Е. Рождественский, Г. А. Малышев

К ОЦЕНКЕ ИСТОЧНИКОВ И СТОКОВ ТЕПЛА В АТМОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

A. E. Rojdestvensky, G. A. Malyshev

ABOUT SOURCES AND ABSORBERS ATMOSPHERIC HEAT FLUX IN THE NORTH HEMISPHERE

На основе представлений о переносе тепла в атмосфере геострофическими движениями воздуха рассчитана структура крупномасштабного теплопереноса и его дивергенция в атмосфере Северного полушария. Найдено, что наиболее интенсивные зоны выноса тепла в атмосфере расположены в краевых зонах континент–океана. В формировании подобных зон важную роль играют и сезонные колебания температуры, и давления воздуха, и его влажность.

Ключевые слова: *геострофический ветер, крупномасштабный перенос тепла в атмосфере, тепловые зоны атмосферы, зоны «источников и стоков» тепла в атмосфере северного полушария.*

On the basis of heat transfer in the atmosphere by geostrophic air movements, calculated structure of the large-scale heat transfer and divergence in the atmosphere of the Northern hemisphere. Found that the most intense zone of removal of heat in the atmosphere located in the edge zones of the continent–ocean. The formation of such zones are play an important role and seasonal fluctuations in temperature and air pressure and humidity.

Keywords: *geostrophic wind, large-scale heat transfer in the atmosphere heat areas of the atmosphere, zones of “sources and sinks” of heat in the atmosphere of the Northern hemisphere.*

Известно, что атмосфера нагревается в основном за счет теплового излучения от поверхности Земли, включая океаны и континенты. В классической климатологии XIX в. нагревателями атмосферы умеренных широт считались континенты — за счет сильного прогрева их поверхности в летнее время. Подтверждением этой концепции является факт более высоких средних температур атмосферы в Северном полушарии по сравнению с южным. Другая концепция, как основа национальной океанографической программы 1981–1988 гг. (рук. акад. Г.И. Марчук), напротив, рассматривает океан как основной источник поступления тепла в атмосферу [4]. Какие же элементы земной поверхности на самом деле являются своеобразными климатическими (в среднем за год) нагревателями атмосферы — океаны или континенты, и в какой пропорции? Ответ не очевиден и дается в данной работе.

Работы по изучению структур крупномасштабного теплопереноса в атмосфере немногочисленны и относятся в основном к меридиональному теплопереносу [7–11, 13]. Настоящая работа отличается тем, что она проведена более масштабно в целом по Северному полушарию на климатических данных и впервые с расчетом дивергенции потоков тепла на градусной сетке всего полушария. Обоснование и первые результаты подобной работы опубликованы в [2, 3]. Настоящая работа дополняет результаты работ

[2, 3] и посвящена нахождению структур дивергенции крупномасштабного теплопереноса в атмосфере, описание которых кратко дается ниже. Дивергенция теплового потока формально указывает на источник тепла (если он существует), поэтому изучение скалярного поля дивергенции тепловых потоков в атмосфере связано с поиском источников и стоков тепла.

Метод расчета крупномасштабной структуры дивергенции потоков тепла в атмосфере Северного полушария

Для получения структуры (карты) потоков тепла в атмосфере вычислим поток тепла, осуществляемый движениями через боковые границы в каждом выделенном элементарном блоке атмосферы. Подобные расчеты ранее не проводились для климатических данных в масштабе Земли или полушария. При изучении крупномасштабного меридионального теплопереноса в атмосфере Земли [7–11] было обнаружено, что не менее 90 % всего меридионального теплопереноса обеспечивается геострофическими движениями атмосферы. Этот факт используется в настоящей работе.

Горизонтальный перенос тепла (Q) через боковую поверхность плоского контура (L) единичной «толщины» на изопотенциальной поверхности равен:

$$Q = C_p \oint_L \rho(x, t) T(x, t) \vec{v}(x, t) dL, \quad [\text{Вт/м}^2], \quad (1)$$

где C_p — теплоемкость; ρ — плотность воздуха; T — температура; $\vec{v}$ — горизонтальная скорость воздуха на горизонтальном контуре L ; dL — элемент контура. Нормальная к контуру геострофическая скорость воздуха равна:

$$(V_g)_n = C_s \left(\frac{1}{\rho f} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial L} \right), \quad [\text{м/с}], \quad (2)$$

где V_{gn} — нормальная составляющая геострофической скорости ветра к контуру L ; f — параметр Кориолиса; P — атмосферное давление; C_s — безразмерный множитель, отражающий изменение модуля геострофического ветра в приземном и пограничном слое [1].

Следовательно, теплоперенос через контур (L) в геострофическом приближении, учитывая (1)–(2), имеет вид (3):

$$Q = C \oint_L \rho T V_n dL = \left(\frac{c}{f} \right) \oint_L T \frac{\partial P}{\partial L} dL, \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (3)$$

Если теплоперенос Q в (3) представить в координатах температур T и геопотенциала (Z) на изобарической поверхности через контур (L), то по аналогии с выводом выражений (2, 3) получим выражение для теплопереноса через поверхность контура (L) в виде координатах температуры (T) и геопотенциала (Z) через контур L :

$$Q = \text{const} \oint_L T \frac{\partial Z}{\partial L} dL, \quad [\text{Вт/м}^2], \quad (4)$$

где $\text{const} = (C_s C_p / fg)$; g — ускорение силы тяжести; C_s — корректирующий множитель модуля геострофического ветра у поверхности земли; C_p — теплоемкость воздуха.

На каждом элементарном контуре атмосферы по климатическим данным полей геопотенциала и температур вычислялись потоки тепла через его контур (боковую поверхность) по формулам (3, 4), значения которых затем наносились на географическую карту и давали структуру глобальных переносов тепла на геопотенциальной поверхности атмосферы. Элементарный контур представлял собой «четырёхугольник» на карте Северного полушария, имеющий размер ячейки сетки данных, в углах которого даны значения температуры и давления воздуха. Разность двух значений давления между соседними узлами расчетной сетки умножалась на среднее арифметическое значение температуры между этими двумя позициями. Значение дивергенции потока тепла присваивалось центру элементарного четырёхугольника. Очевидно, значение теплопотока через боковую поверхность контура в (3, 4) равно интегралу от дивергенции поля теплопотока по области, заключенной в контуре. Поэтому представленные ниже карты тепловых потоков через контуры зон одновременно есть карты дивергенции теплового потока внутри этих зон. Одинаковые значения дивергенции (см. выражения 3, 4) соединялись изолиниями на карте, которые ограничивали крупномасштабные зоны. Также очевидно, что на контуре подобных зон тепловой поток постоянен по модулю. В этом смысле контуры подобных «объединенных» зон есть зоны выноса (или вноса) тепла через контур и одновременно зоны дивергенции потоков тепла. Подобное пояснение снимает возможную терминологическую путаницу.

Используемые данные и проведенные расчеты

Использовались климатические ежемесячные данные температур и геопотенциала атмосферы в узлах 5-градусной сетки северного полушария в приземном слое и на семи изобарических поверхностях 850–30 мб [12]. Для каждого элементарного контура (четырёхугольник $5 \times 5^\circ$ на изобарической поверхности) рассчитывалось значение теплопотока через его границы согласно (3). Основной массив климатических данных на изобарических поверхностях относится к периоду 1948–2010 гг. [12]. На каждой изобарической поверхности строилась карта изолиний дивергенции потока тепла. Положительные значения дивергенции соответствуют выносу тепла из контура (источник тепла), отрицательные значения — вносу тепла или зоне его поглощения. В итоге были получены карты Северного полушария на семи изобарических поверхностях за каждый из 12 климатических месяцев, а также в среднем по сезонам и в целом за год, включая интегральные данные в приземном слое атмосферы (всего 127 карт, которые не приводятся в данной публикации). Частично подобные работы в начальном варианте были опубликованы ранее в работах [2, 3] на более крупномасштабной сетке $5 \times 10^\circ$.

Климатическая крупномасштабная структура зон нагревания и охлаждения в атмосфере Северного полушария

На рис. 1 представлена структура дивергенции крупномасштабного теплопереноса в северном полушарии севернее 20 градусов широты для изобарической поверхности

850 мб. Результаты расчетов обнаружили достаточно любопытную картину. Неожиданным является тот факт, что зоны выноса и вноса тепла в атмосфере как объемные источники и «стоки тепла» образуют на карте структуру, принципиально не повторяющую контуры материков и океанов, и расположенную в основном в пограничных регионах на границах материков и океанов.

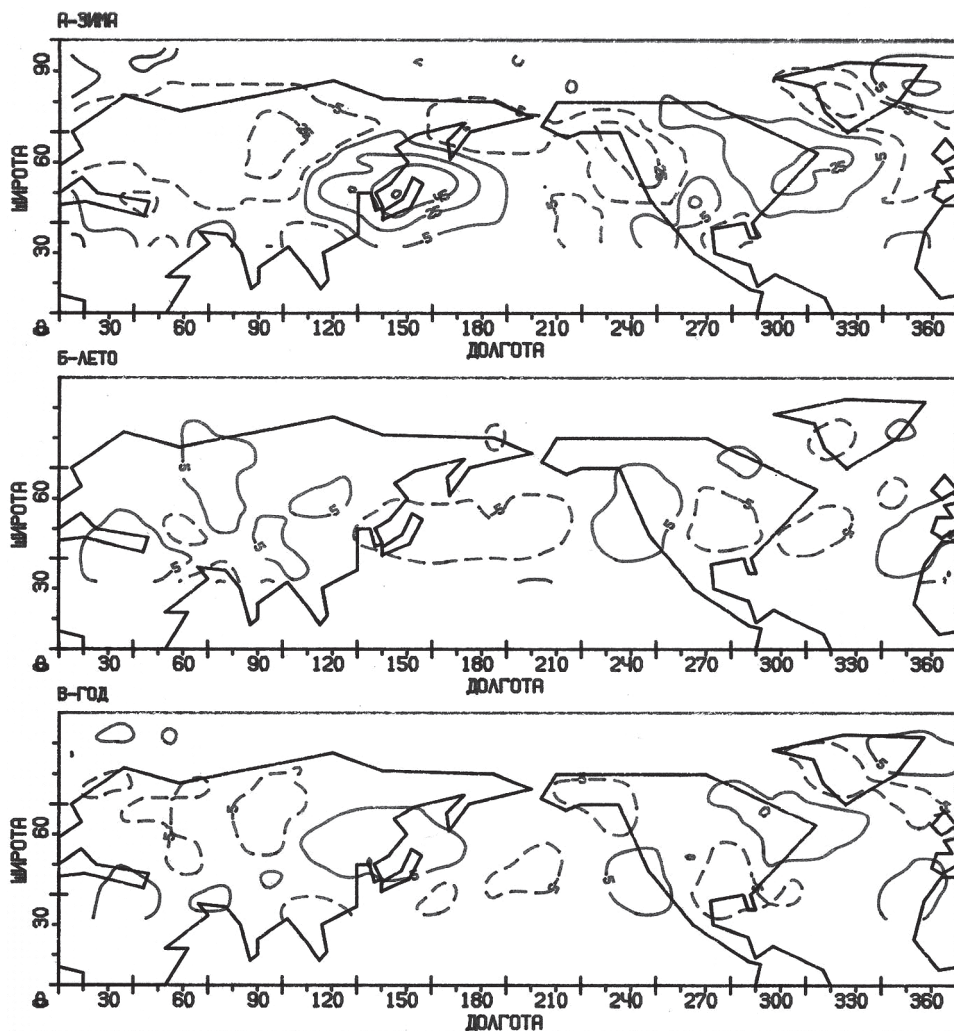


Рис. 1. Для Северного полушария даны зоны дивергенции (сплошной контур) и «конвергенции» тепловых потоков в атмосфере (штриховой контур). Карты показывают зимние, летние и средние за год структуры тепловых потоков на изобарической поверхности 850 мб как источники и стоки тепла. Контуры континентов сглажены. Размерность на изолиниях 10^{-3} Вт/м², как поток тепловой энергии через единичную площадку контура

Как следует из рис. 1, зоны дивергенции крупномасштабных теплотоков в атмосфере не образуют на карте мелкой мозаичной картины, а объединяются в однородные по знаку области. Контурные этих областей практически сохраняют все качественные и структурные особенности при изменении масштабов расчетной сетки. Также было обнаружено, что структура теплопереноса на поверхности 850 мб хорошо согласуется со структурой теплопереноса в приземном слое и в атмосфере на высотах 700–300 мб.

Наиболее интенсивные зоны выноса тепла расположены в атмосфере над пограничными зонами океан–континент — на восточных границах материков. При этом обнаруживается тенденция их «двуядерности» — одно интенсивное ядро выноса тепла лежит в океане, другое — на континенте, и они как бы притягиваются к береговой черте, образуя единую зону выноса тепла в атмосфере как источник тепла по отношению к остальной атмосфере.

Подобное расположение этих наиболее интенсивных зон выноса тепла в атмосфере находит достаточно ясное объяснение. Интенсивное ядро выноса тепла в атмосфере над океанами совпадает с энергоактивными зонами океана (Гольфстрим, Курисио), где наблюдаются интенсивные потоки тепла из океана в атмосферу. В свою очередь зимний муссон на восточных побережьях материков в среднеширотных районах Северного полушария интенсивнее летнего (расположенного на западных побережьях материков).

Эти факторы приводят к образованию наиболее интенсивных среднеширотных климатических зон выноса тепла в атмосфере в крупномасштабных пограничных областях океан–материк. Таким образом, климатическими нагревателями атмосферы являются в основном не материки или океаны, а их части как крупномасштабные границы океан–континент. Центральные части материков и океанов являются «холодильниками» для атмосферы в среднегодовых климатических условиях. Особенно ярко это проявляется в центральной части Тихого океана и в центре ЕвроАзии (рис. 1).

По аналогии с энергоактивными зонами океана (зоны наиболее интенсивных потоков тепла из океана в атмосферу), зоны повышенной дивергенции потоков тепла в атмосфере назовем «тепловыми зонами».

Из рис. 1 следует, что Гренландия, с точки зрения формирования крупномасштабного теплопереноса в атмосфере, ведет себя не просто как большой остров, а как полноценный материк. Подобно ЕвроАзии и Северной Америке, Гренландия имеет на своих западных и восточных границах атмосферы области выноса тепла. Априори этот факт не очевиден и ранее не обсуждался.

Интенсивная область стока тепла видна также в центре и восточной части ЕвроАзии. На первый взгляд, расположение зоны стока тепла в центре северной части Тихого океана является неожиданностью. Однако этот факт не случаен. Находясь в центре самого обширного океана, данная область не испытывает муссонного влияния, как и внутриконтинентальная часть самого крупного материка на Земле. Эта область была ранее выделена как область «чисто океанического климата», причем с иной аргументацией, чем в настоящей работе [6].

К оценке источников и стоков тепла в атмосфере Северного полушария

Рассмотрим вопрос, какая часть климатических источников тепла в атмосфере обеспечивается только годовыми колебаниями температуры и геопотенциала. Для

этого была рассчитана дивергенция тепла в атмосфере на высоте 850 мб по осредненным за год данным температур и давления, а также суммарная дивергенция потоков тепла как сумма за 12 месяцев по среднемесячным данным. Разность этих значений показывает вклад сезонных колебаний температур и давления в крупномасштабную структуру дивергенции потоков тепла.

На рис. 2 представлены три карты: сверху дана карта теплопотоков $\bar{Q}$, построенная по среднегодовым величинам P , T . Назовем теплопотоки $\bar{Q}$ условно постоянными, или «климатическими». Внизу рис. 2 представлена карта суммарных потоков тепла за год $\langle Q \rangle$ как сумма за 12 месяцев. В середине рис. 2 дана карта потоков тепла, как разность величин $\tilde{Q} = (\langle Q \rangle - \bar{Q})$. Очевидно, что величина $\tilde{Q}$ появляется за счет сезонных колебаний определяющих параметров в годовом цикле. На рис. 2 области, где величина $\tilde{Q} \geq 0$ заполнены крестиками (+), в этих областях сезонные колебания усиливают постоянные климатические источники тепла. Нетрудно видеть, что эти положительные зоны, где сезонные колебания температур и давления усиливают источники тепла в атмосфере, совпадают с климатическим источником тепла в мощной Азиатско-Тихоокеанской зоне (с небольшим смещением к югу), на восточном и северо-западном побережье Америки, по всей акватории Северного Ледовитого океана.

Интересно, что над Азией в ее центральной и северной частях, присутствуют наиболее обширные источники тепла в атмосфере, возникающие исключительно за счет сезонного хода температур и геопотенциала.

Зоны стока тепла за счет сезонных колебаний (рис. 2) имеют вид прослоек между краевыми и центрально-материковыми областями (ЕвроАзия), и они по-другому ведут себя в Атлантике и на Американском континенте. Анализ этих различий ждет исследователей. Но и здесь, в местах расположения энергоактивных зон океана (Калифорнийская, Гольфстрим-Бермуды), наблюдаются локальные зоны атмосферы, где сезонный ход усиливает климатические источники тепла.

Обсуждение результатов

Полученные выше результаты показывают, что основными климатическими «нагревателями» атмосферы являются собственно не океаны или континенты, а крупномасштабные пограничные области между ними. Заметим, что атмосфера Северного полушария теплее южного, при этом важную роль в этом различии играют крупномасштабные пограничные зон океан—континент [5].

Полученные результаты подтверждают концепцию, что атмосферу греют не континенты как таковые, а пограничные структуры поверхности Земли между океанами и континентами за счет «преимущественного нахождения континентов» в Северном полушарии. Это неочевидно, если учесть, что доля поглощаемого солнечного тепла поверхностью Земли в южном полушарии выше, чем в северном.

Рассмотрим роль влажности в формировании источников тепла (зон дивергенции теплопотока) в атмосфере. Водяной пар, поступающий в атмосферу над пограничными энергоактивными зонами океана, частично «срабатывает» над континентами с выделением тепла при конденсации в процессе сезонной муссонной деятельности, образуя ядро источника тепла в пограничной зоне континента. Интенсивность источников

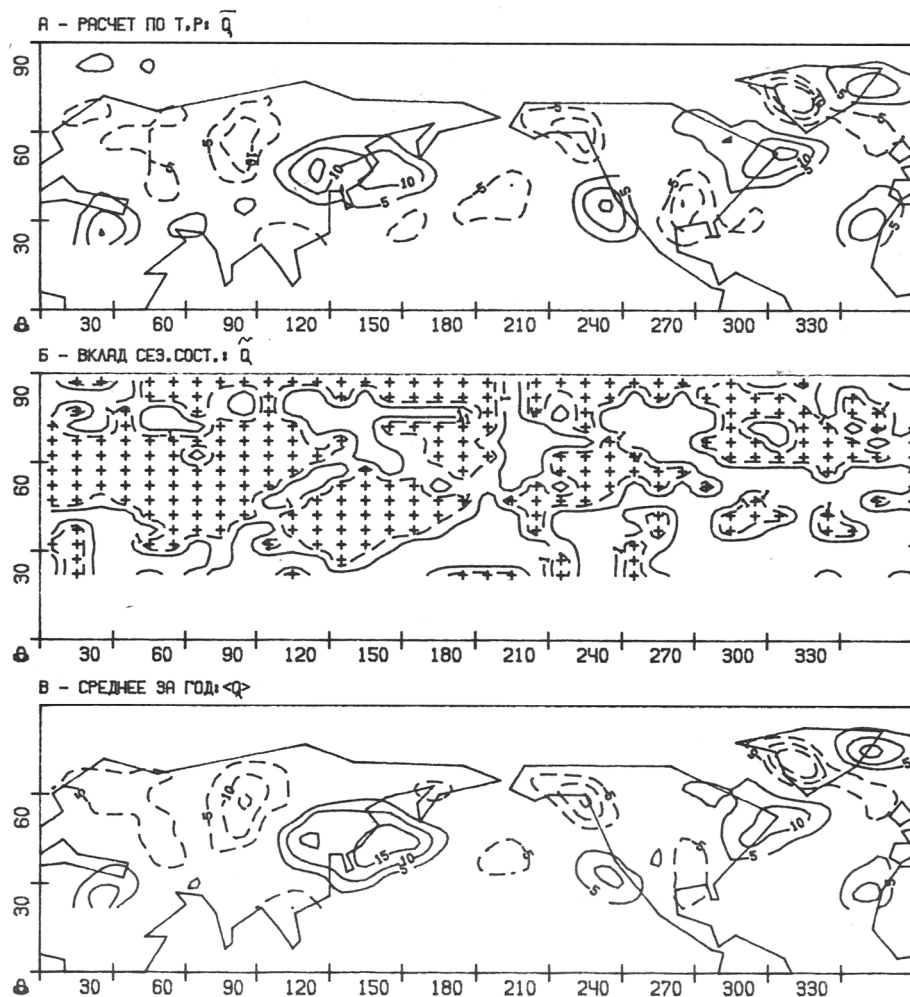


Рис. 2. Вклад сезонных колебаний температур в образование зон источников тепла в атмосфере (тепловых зон). Изобарическая поверхность 850 мб. Крестиками отмечены зоны, где сезонные колебания температур и давления атмосферы усиливают дивергенцию теплового потока и перенос тепла через контуры зон. Размерность потока тепла на изолиниях 10^{-3} Вт/м²

тепла в атмосфере зависит от пространственного рассогласования крупномасштабных полей давления и температур. Плотность воздуха (ρ) на геопотенциальной поверхности зависит в основном от двух параметров — температуры и парциальной доли водяного пара $\rho = \rho(T, E)$. Соответственно, давление атмосферы на геопотенциальной поверхности является функцией температуры воздуха и парциального давления водяного пара $P = P(T, E)$. Дифференцируя это равенство, представим градиент давления воздуха в виде суммы градиентов температуры и влажности в виде [1] :

$$\nabla P = (\text{Const})_1 (\nabla T) + (\text{Const})_2 (\nabla E). \quad (5)$$

Градиент давления в форме (5) в основном определяет крупномасштабный геострофический ветер (3) [1]. Подставляя (5) в (2–3), получим:

$$Q(t) = \text{Const} \oint_L T \left(\frac{\partial E}{\partial L} \right) dL. \quad (6)$$

При выводе (6) учтено тождество для любого контура L : $\oint_L T \frac{\partial T}{\partial L} dL = 0$.

Согласно (6) основной вклад в возникновение «источников» тепла в атмосфере, как областей дивергенции потоков тепла, вносит влажность. Заметим, что выражение (6) констатирует факт формирования зон выноса тепла в атмосфере за счет влажности, но не отвечает на вопрос, каким образом «скрытое тепло» динамически формирует тепловые зоны атмосферы. Поскольку крупномасштабные поля влажности в атмосфере «срабатывают» в пограничной области океан–континент в режиме «муссонной» деятельности, то появление наиболее интенсивных областей выноса тепла в атмосфере на рис. 1–2 понятно. Структура полей влажности в атмосфере совершенно не похожа на структуру поля температуры, и «формально» кинематические последствия этого факта приводят к возникновению областей со значительными сдвиговыми фазами в полях давления и температур, откуда следуют динамические последствия в виде появления в атмосфере крупномасштабных источников и стоков тепла. Если поля влажности и температуры линейно согласованы между собой $E(x, t) = \text{Const } T(x, t)$, то интеграл в (6) тождественно равен нулю. В этом случае никаких зон выноса тепла в атмосфере не обнаружится. Наибольшее рассогласование полей влажности и температур атмосферы в климатической системе наблюдается в пограничных (переходных) зонах океан–континент, именно здесь фактически располагаются источники интенсивного выноса тепла в атмосфере.

Заключение

1. Климатические источники тепла в атмосфере (зоны с экстремальной дивергенцией потоков тепла) располагаются не над континентами и не над океанами, а на границе океан–континент в среднеширотной зоне. По этой причине среднегодовая (климатическая) температура приземного воздуха в Северном полушарии теплее, чем в Южном, а структура крупномасштабного теплопереноса в атмосфере не совпадает со структурой границ океанов и континентов. Крупномасштабные зоны выноса тепла в атмосфере можно назвать «источниками тепла», или зонами «проветривания», а зоны «стока» (поглощения) тепла являются зонами «всасывания» тепла. Крупномасштабные атмосферные зоны теплового «проветривания» и «всасывания» создают режим глобальной «экологии атмосферы», так как «проветривание» связано одновременно с зонами выноса или аккумуляции примесей в воздухе.

2. Источники тепла в атмосфере над океанами совпадают с расположением краевых среднеширотных энергоактивных зон океана, откуда в атмосферу поступает тепло. Однако тепловая зона атмосферы принципиально расположена не целиком

над энергоактивной зоной океана, а занимает также часть континента и располагается в краевой зоне континент—океан.

3. Наиболее мощная тепловая зона атмосферы на востоке азиатского континента имеет «двухочаговый характер», один очаг которой располагается над океаном, а другой — над континентом.

4. Летние и зимние структуры теплопереноса в атмосфере Северного полушария принципиально различны. Летняя структура не выводится из зимней подобием, то есть подобной трансформацией формы.

5. В среднем за год в средних широтах на западной оконечности материков наблюдаются отрицательные зоны потоков тепла (источники холода), которые интенсифицируются летом в связи с холодным океанским апвеллингом, и положительные зоны источников тепла на восточной границе континентов.

6. Наиболее интенсивные «тепловые зоны атмосферы» расположены в средних широтах в районах наибольших температурных контрастов океан—материк.

7. В расположении и интенсивности «тепловых зон атмосферы» основную роль играет влажность воздуха за счет изменения теплоемкости воздуха, фазовых переходов и изменения давления атмосферы.

8. Азиатский материк является самым мощным «стабилизатором» сохранения структурной формы теплопереноса в атмосфере Северного полушария в годовом периоде при сезонных колебаниях параметров, определяющих теплоперенос.

Литература

1. Гулев С.К., Лаппо С.С., Рождественский А.Е. Параметризация среднегодовых потоков тепла между океаном и атмосферой // Известия АН СССР, ФАО. 1985. № 7. Т. 21.
2. Малышев Г.А. Крупномасштабный теплоперенос в атмосфере над океанами: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: ГОИН, 1992.
3. Малышев Г.А., Рождественский А.Е. Сезонные температурные колебания и глобальный теплоперенос в атмосфере Земли // Методы измерения и анализа гидрофизических характеристик. — М.: Гидрометеиздат, 1991. — С. 45–65.
4. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Саркисян А.С. и др. Энергоактивные зоны: концептуальные вопросы // Итоги науки и техники. Сер. Атмосфера, Океан. Космос, программа Разрезы. 1989. Т. 10. — С. 240.
5. Рождественский А.Е., Лаппо С.С. Крупномасштабный теплоперенос между океаном и атмосферой в годовом цикле // ДАН СССР. Сер. Математическая физика. 1989. Т. 301. № 1.
6. Рождественский А.Е., Семенов М.В. Модельная интерпретация сезонного хода пограничных температур воздуха и воды Мирового океана // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 5.
7. Farneti R., Vallis G. Meridional energy transport in the coupled atmosphere-ocean system compensation and partitioning // J. Clim. 2013. Vol. 26. — P. 7151–7166.
8. Lau N., Wallace J. On the distribution of horizontal transport by transient eddies in the northern hemisphere wintertime circulation // J. Atm. Sci. 1979. Vol. 36. // P. 1844–1861.
9. Magnusdottir G., Saravanan R. The response of atmospheric heat transport to zonally averaged SST trends // Tellus. 1999. Vol. 51A. — P. 815–832.
10. Oort A. The observed annual cycle in the meridional transport of atmospheric energy // J. Atm. Sci. 1971. Vol. 28. — P. 325–339.
11. Trenberth K.E., Caren J.M. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transport // J. Clim. 2013. Vol. 14. — P. 7151–7166.
12. U.S. NOAA Earth System Research Laboratory. Climate data Air mon. mean. nc. Wunsh C. The total meridional heat flux and its oceanic and atmosphere partition // J. Clim. 2005. Vol. 18. — P. 4374–4380.