

# Построение «диаграммы переноса» для изучения полярного переноса влаги в атмосфере над Мировым океаном по данным спутникового мониторинга

Г.Р. Хайруллина<sup>1</sup>, Н.М. Астафьева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (МФТИ)

E-mail: [x.g.r.@list.ru](mailto:x.g.r.@list.ru)

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: [ast@iki.rssi.ru](mailto:ast@iki.rssi.ru)

Спутниковый мониторинг Земли предоставляет данные наблюдения за процессами в атмосфере в виде полей и позволяет наблюдать и изучать особенности атмосферных вихревых движений с большими горизонтальными масштабами. Они являются важным элементом общей циркуляции атмосферы, вносят большой вклад в полярный перенос массы (влаги особенно) и тепла в атмосфере и тем самым участвуют в формировании погоды и климата планеты. Для детального изучения распределения влагозапаса в атмосфере сконструированы широтно-временные диаграммы [1], позволяющие изучать полярный перенос влаги, используя данные микроволнового спутникового мониторинга. В диаграммах последовательно ото дня ко дню собирается информация (в выбранной области Мирового океана) об интегральном по долготе распределении яркостной температуры на разных широтах. Широтно-временные диаграммы демонстрируют распределение влагозапаса атмосферы в плоскости время – широта. Совместный анализ диаграмм переноса и динамики атмосферы по ежесуточным радиотепловым полям из электронной коллекции GLOBAL-Field [2, 3] показал, что распределение яркостной температуры, измеряемой в резонансной линии водяного пара (и энергетику атмосферы) во многом определяют горизонтальные атмосферные движения — вихри и фронты. Тропические циклоны, формирующиеся в приэкваториальной зоне и продвигающиеся в более высокие широты, играют важную роль в формировании переноса влаги (и тепла) из экваториальных областей в средние и средне – высокие широты, вплоть до 70-х градусов широты. Крупномасштабное атмосферное окружение — расположение и интенсивность квазистационарных центров действия — определяет региональные особенности полярного переноса, оказывая, в частности, влияние на треки тропических циклонов.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 06-05-64276-а.

## Введение

Полярный перенос является одним из важных элементов климатической системы. Он осуществляет межширотный перенос тепла и массы из приэкваториальных областей в более высокие широты, влияет на транспортные свойства атмосферы и на формирование климата. Благодаря полярному переносу, градиент температуры между экваториальными и полярными областями сглаживается. В результате обеспечиваются более благоприятные климатические условия для жизни на Земле. Поэтому изучение полярного переноса имеет большое значение для понимания процессов в атмосфере и океане.

В настоящей работе для изучения полярного переноса используются данные спутникового мониторинга, поставляемые программой DMSP (Defense Meteorological Satellite Program <http://dmsp.ngdc.noaa.gov/dmsp.html>). Сотрудниками 55 отдела ИКИ РАН написан алгоритм, позволивший на основе полосовых данных СВЧ- радиометрических приборов SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager), стоящих на борту спутников программы DMSP, построить поля радиояркостной температуры с глобальным покрытием Земли [2, 3]. Глобальные радиотепловые поля с хорошим пространственно-временным разрешением собраны в электронной коллекции GLOBAL-Field (2 полных поля в сутки с разрешением по поверхности 0,5x0,5°, за период от 1999 до 2005гг., примеры полей представлены на сайте <http://www.iki.rssi.ru>). Пространственно-временное разрешение радиотепловых полей коллекции позволяет изучать структуру атмосферных процессов над Мировым океаном с масштабами от сотен километров до планетарных и от синоптиче-

ских до внутри- и междугодовых.

Радиометрические приборы SSM/I регистрируют излучение на четырех частотах, несущее информацию о разных физических объектах, см. таблицу 1. Если бы атмосфера не содержала примесей и была абсолютно сухой и прозрачной, то приборы SSM/I регистрировали бы радиояркостную температуру поверхности Мирового океана и суши. Однако в атмосфере есть примеси, имеющие резонансные линии поглощения в радиодиапазоне на определенных частотах. Приборы SSM/I принимают излучение на частотах, отражающих присутствие в тропосфере примеси воды в разных видах (водяной пар и капли воды разных размеров, например).

Таблица 1. Частоты многоканальных радиометров SSM/I и физические объекты, информация о которых регистрируется в рамках программы DMSP

Частота, ГГц	Длина волны, см	Физические объекты
19,35	1.58	видимая поверхность: континенты, Мировой океан, наиболее плотные облачные структуры (с жидкими осадками)
22,24	1.35	интегральный влагозапас (водяной пар) тропосферы
37,00	0.81	Интегральный влагозапас тропосферы
85,50	0.35	интегральный влагозапас тропосферы, включая жидкие и кристаллические осадки

Так как излучение с длинами волн больше 1 см практически свободно проходит через облачный покров земной атмосферы, а облака в среднем закрывают около 55% земной поверхности, то радиокно предоставляет единственную возможность «заглянуть» под облака и зафиксировать процессы, происходящие между облаками и поверхностью Земли и внутри облачных масс. В частности, получить информацию об интегральном содержании воды и водяного пара в тропосфере.

Поскольку влага и вода в заморожены в движение, то подробный анализ радиотепловых полей позволит продвинуться в понимании пространственно-временной динамики крупномасштабных движений, а также переноса влаги и воды в атмосфере (из тропиков в высокие широты, в частности).

### Методика изучения особенностей полярного переноса на основе широтно-временной диаграммы

**Построение широтно-временной диаграммы.** Для детального изучения полярного переноса в атмосфере сконструированы широтно-временные диаграммы [1], позволяющие изучать структуру полярного переноса, используя глобальные радиотепловые поля  $\Theta_{19}$ ,  $\Theta_{22}$ ,  $\Theta_{37}$  и  $\Theta_{85}$  из электронной коллекции Global-Field.

Диаграмма строится следующим образом:

- на глобальном радиотепловом поле выбирается область исследования;
- радиояркостная температура в выбранной области интегрируется по долготе; в результате получаем распределение радиояркостной температуры по широте в заданный день;
- в широтно-временной диаграмме («диаграмме переноса») последовательно от дня ко дню собирается информация об интегральном по долготе распределении радиояркостной температуры на разных широтах.

Широтно-временные диаграммы, построенные по серии глобальных радиотепловых полей за 2005 год [1] позволили изучить внутригодовые (сезонные, в частности) и некоторые региональные особенности распределения влагозапаса тропосферы. Кроме того, показано, что распределение яркостной температуры во многом определяют горизонтальные атмосферные движения — вихри и фронты. Тропические циклоны играют важную роль в формировании переноса влаги (и, следовательно, тепла) из экваториальных областей в средние и средне – высокие широты.

С целью изучения *долговременных* изменений распределения влагозапаса на основе полу-

ченных диаграмм были построены кривые «переноса».

**Кривая «переноса».** Широтно-временные диаграммы на разных частотах дают информацию о распределении яркостной температуры (о распределении примеси пара или воды) от суток к суткам и, соответственно, о поведении переноса примеси от суток к суткам по широте. Нас интересовали долговременные изменения распределения влагозапаса, поэтому на основе полученных диаграмм были построены кривые «переноса». Кривая получается путем усреднения по времени информации, содержащейся в широтно-временной диаграмме. В данной работе усреднение производилось по данным за 7 лет — за период с 1999 по 2005 гг.

В левой части рис. 1 представлен фрагмент широтно-временной диаграммы: по оси абсцисс отложено время от 180 до 365 дня (вторая половина 2005 года), по оси ординат отложена широта от 60°с.ш. до 60°ю.ш. В правой части того же рисунка представлена полученная по данным диаграммы кривая «переноса». Кривая показана в плоскости интенсивность — широта: по оси абсцисс отложена интенсивность (яркостная температура, свидетельствующая о содержании соответствующей примеси), по оси ординат отложена широта (от 60°с.ш. до 60°ю.ш.).

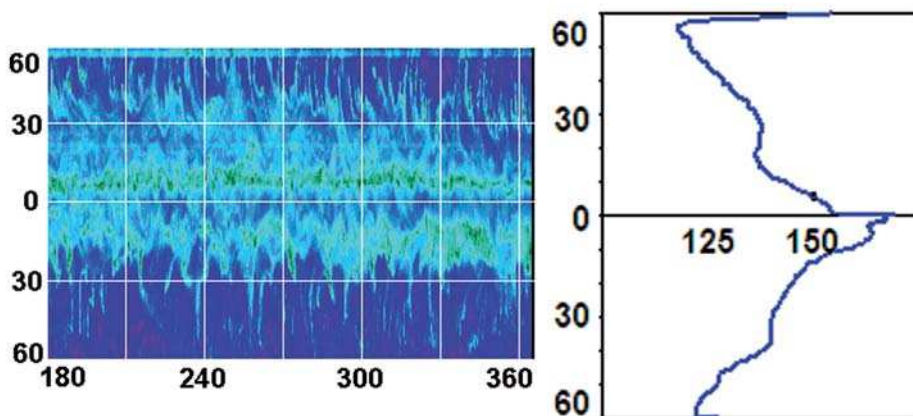


Рис. 1. Фрагмент широтно-временной диаграммы (слева) и соответствующая кривая «переноса» (справа)

Кривая в правой части рис. 1 демонстрирует широтное распределение интенсивности радиояркостной температуры (усредненной по долготе и времени). Анализ широтно-временных диаграмм и кривых «переноса» позволяет выявить некоторые характерные особенности полярного переноса и, в частности, определить широты с наиболее повышенной и пониженной интенсивностью переноса.

Ниже представлены широтно-временные диаграммы и кривые «переноса», характеризующие распределение влаго- и водозапаса в атмосфере над разными регионами двух океанов — Тихого и Атлантического. Фактически, полученные кривые «переноса» содержат информацию о среднем за 7 лет (1999-2005гг.) распределении влаго- или водозапаса атмосферы по широте. Сравнение кривых «переноса», полученных для разных областей, позволило изучить региональные особенности и определить причины различного поведения полярного переноса над разными акваториями Мирового океана. Все кривые представлены далее в плоскости широта – интенсивность: по оси абсцисс отложена широта от 60°с.ш. до 60°ю.ш., по оси ординат — интенсивность.

### Широтно-временные диаграммы и кривые «переноса» по радиотепловым полям $\Theta 19$

**Атлантика.** Для изучения особенностей переноса над акваторией Атлантического океана были выбраны области, показанные на радиотепловом поле  $\Theta 19$ , см. рис. 2. В северной части Атлантики выбрана область А1 от 40 до 50°з.д., в Южном полушарии — область А2 от 25 до 35°з.д. Кроме того, в Северном полушарии была выбрана дополнительная область А3 — от 25 до 35°з.д. Все три области распространяются по широте от экватора до  $\pm 60^\circ$  широты.

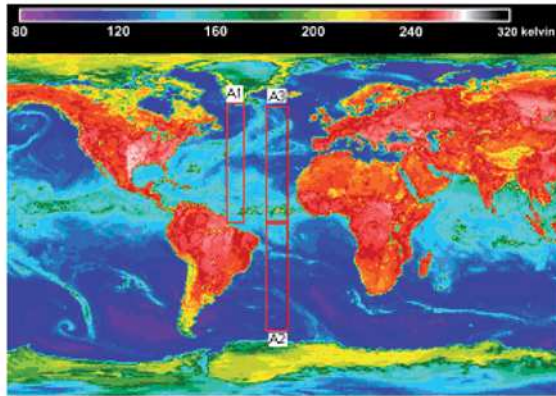


Рис. 2. Атлантический океан; поле радиоактивной температуры  $\Theta_{19}$  с выделенными областями A1, A2 и A3

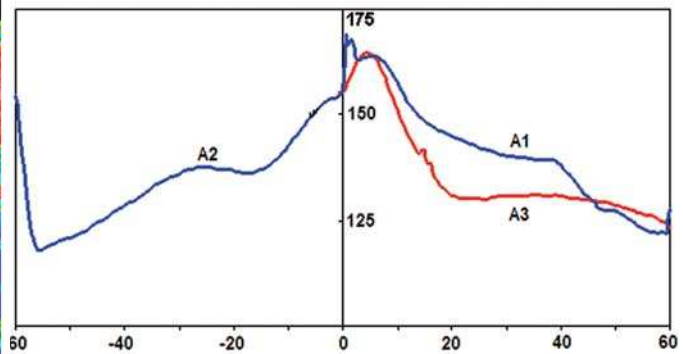


Рис. 3. Кривые «переноса» для выделенных над Атлантическим океаном областей A1, A2 (синие справа и слева) и A3 (красная)

На рис. 4 представлены кривые «переноса» для областей в Атлантическом океане; левая часть кривой соответствует области A2 в Южном полушарии, правая часть — области A1 в Северном полушарии, красная кривая — области A3. На кривой можно выделить следующие характерные детали: повышенная интенсивность вблизи экватора, с максимумом, находящимся приблизительно на  $7-8^{\circ}$  с.ш.; задержка спада и наличие площадок в диапазонах  $15-30^{\circ}$  ю.ш.,  $30-40^{\circ}$  с.ш. и  $45-50^{\circ}$  с.ш.; резкий излом и рост около  $60^{\circ}$  с.ш. и вблизи  $55^{\circ}$  ю.ш. Повышенная интенсивность переноса вблизи экватора согласуется с расположением зоны внутритропической конвергенции, которая смещена к северу от экватора. Спад интенсивности в средних широтах может быть связан с влиянием крупномасштабной атмосферной ситуации в выбранном районе, в частности, с влиянием центров действия (антициклонов и депрессий) на траектории атмосферных вихрей. В Атлантическом океане действуют Азорский антициклон и Исландская депрессия в Северном полушарии, а также Южно-Атлантический антициклон в Южном полушарии. Резкий рост интенсивности кривой в высоких широтах полушарий связан с попаданием в область исследования ледового покрова, имеющего высокую яркостную температуру.

Азорский антициклон блокирует доступ потоков воздуха (и перенос влаги и воды, соответственно), пришедших из приэкваториальной области, в более северные широты. Как и ожидалось, в области A3, проходящей через центр Азорского антициклона (приблизительно около  $25-35^{\circ}$  з.д.) получен более резкий спад интенсивности переноса в области A3 на широтах от  $10$  до  $20^{\circ}$  с.ш. (красная кривая на рис. 3) по сравнению со спадом на соответствующих широтах в области A1 (синяя кривая). Тропические циклоны огибают Азорский антициклон и крайне редко приносят туда влагу.

Известно, что в приэкваториальной зоне в Южном полушарии над Атлантическим океаном тропические циклоны не формируются. Однако, широтно-временная диаграмма, построенная для области A2 и представленная в нижней части рис. 4, свидетельствует о том, что в этой области перенос влаго- и водозапаса по широте все-таки происходит. Возникает вопрос: если там не формируются тропические циклоны, то какие движения могут осуществлять зарегистрированный перенос?

По оси абсцисс здесь отложено время от 1 до 365-го дня года, по оси ординат — широта от экватора до  $60^{\circ}$  с.ш. в верхней части рис. 4 и до  $60^{\circ}$  ю.ш. в нижней.

Широтно-временная диаграмма для области A2 позволяет заключить, что структуры, содержащие влагу и воду, распространяются не только в приэкваториальной области, но и на средних



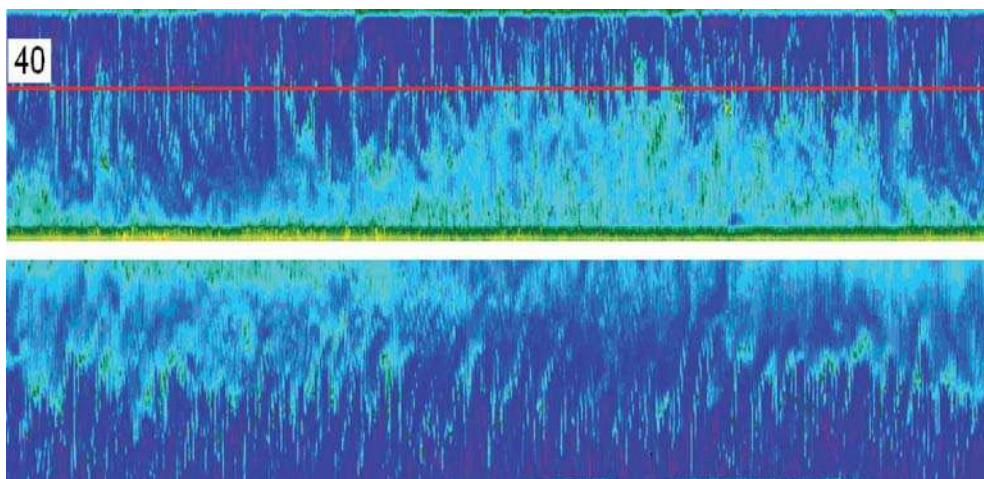


Рис. 4. Широтно-временная диаграмма для области А1 (вверху) и А2 (внизу)

широтах. Причем, виден сезонный ход — заметное снижение интенсивности в летние месяцы, т.е. зимой Южного полушария. Диаграмма также свидетельствует о том, что атмосферные структуры, несущие влагу и воду, распространяются не с северо-запада на юго-восток, как это должно было быть в Южном полушарии, а наоборот — с юго-запада на северо-восток. Об этом явно свидетельствуют наклоны их следов на диаграмме.

В используемом диапазоне частот суша имеет большую яркостную температуру. Поэтому на глобальных радиотепловых полях сложно проследить продвижение атмосферных структур над материком, например, Южной Америкой. Тем не менее, на сериях радиотепловых полей из коллекции GLOBAL-Field можно увидеть, как «хвосты» тропических циклонов, пришедшие с высоких широт Тихого океана и быстро пройдя над узкой южной частью материка, продвигаются в северо-восточном направлении над экваторией Атлантического океана. На широтно-временной диаграмме в нижней части рис. 4 видны действительно отпечатки «хвостов» Тихоокеанских тропических циклонов. Тропические циклоны, формирующиеся в восточном зональном потоке в Южном полушарии над экваторией Тихого океана, продвигаются на юг и попадают в западный зональный поток средних широт. Наиболее интенсивные из них достигают 50-55° ю.ш., огибают Южную Америку и узкими фронтами пересекают Южное полушарие над Атлантикой в направлении на северо-восток. При этом они несут с собой воду и влагу, что и демонстрирует широтно-временная диаграмма на рис. 4.

Кроме того, следует отметить присутствие воздушных масс, которые продвигаются в западном направлении над экваториальной Атлантикой, заходят на территорию Южной Америки, а затем разворачиваются и опять выходят на экваторию Атлантического океана. Слежение за этими атмосферными движениями осложнено тем, что суша имеет большую радиояркостную температуру. Однако, можно выявить следующую траекторию их движения: они входят на территорию Бразилии почти на экваторе (в устье Амазонки) и перемещаются над Бразилией в юго-западном направлении; приближаясь к Перу и Боливии они разворачиваются на юго-восток и выходят на экваторию Атлантического океана вблизи 25 - 30° ю.ш. Эти массы воздуха несут с собой влагу и воду, что и позволяет проследить за их продвижением по сериям радиотепловых полей. Их следы также видны на широтно-временных диаграммах.

*Тихий океан.* Для изучения особенностей переноса над экваторией Тихого океана были выбраны области, показанные на рис. 5. В северной части Тихого океана выбрана область Т1 от 150 до 180° з.д, область Т2 от 120 до 130° з.д и область Т3 от 145 до 155° в.д, в Южном полушарии — область Т4 от 165 до 175° з.д. и область Т5 от 100 до 110° з.д. Все области по широте распространяются от экватора до ±60° широты.

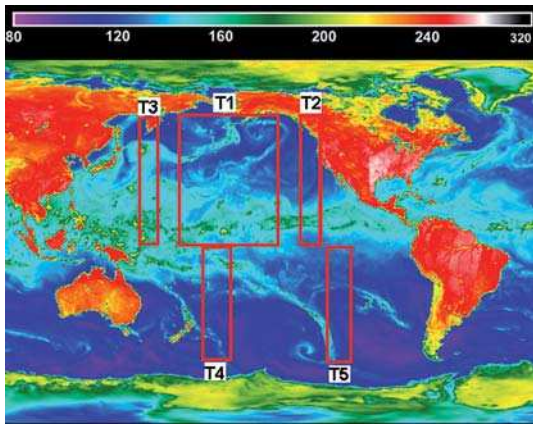


Рис. 5. Тихий океан; радиотепловое поле  $\Theta_{19}$  с выделенными областями T1, T2, T3, T4 и T5

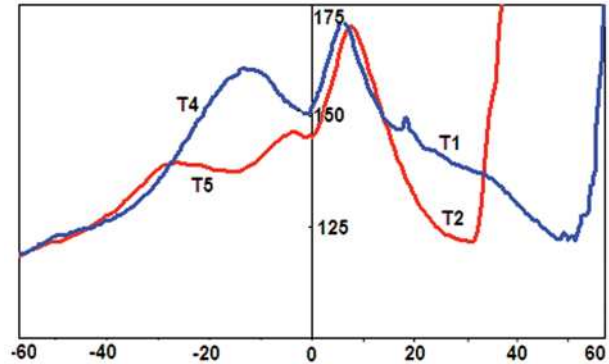


Рис. 6. Кривые «переноса» для выделенных над акваторией Тихого океана областей T1, T2, T3 и T4

Над акваторией Тихого океана действуют Гавайский антициклон и Алеутская депрессия в Северном полушарии, а также Южно-Тихоокеанский антициклон в Южном. Эти квазистационарные атмосферные центры действия формируют крупномасштабную структуру поля давления и влияют на траектории тропических циклонов и на структуру кривых «переноса», построенных для соответствующих областей, см. рис. 5.

Области T1 и T2. Повышенная интенсивность вблизи экватора согласуется с зоной внутритропической конвергенции. Небольшой пик на  $20^\circ$  связан с попаданием в область T1 Гавайских остров ( $20^\circ$ с.ш. и  $160^\circ$ з.д.). Резкий рост в высоких широтах связан с попаданием в область исследования суши. Кривые «переноса» в областях T1 и T3 очень схожи. Влияние Гавайского антициклона заметно сказывается на структуре кривой T2 — выбранная область находится несколько восточнее центра антициклона, приблизительно около  $120\text{--}130^\circ$ з.д. Резкий спад на кривой связан с тем, что антициклон блокирует доступ влажного воздуха приэкваториальных широт в северные широты области T2 (резкий рост севернее  $35^\circ$ с.ш связан с попаданием в область исследования суши).

Области T4 и T5. На кривой T4 выделяется пик, связанный с тем, что область T4 проходит через зону активного формирования тропических циклонов. Область T5 находится рядом с центром Южно-Тихоокеанского антициклона — на соответствующей кривой спад интенсивности и небольшое повышение интенсивности на средних широтах. На более высоких широтах, где влияние антициклона на потоки воздуха незначительное, кривые для двух областей T4 и T5 практически совпадают.

### Кривые «переноса» по радиотепловым полям на разных частотах и широтное распределение влагозапаса

На рис. 7 представлены кривые «переноса», построенные по радиотепловым полям  $\Theta_{19}$ ,  $\Theta_{22}$  и  $\Theta_{37}$ .

Повышенная интенсивность вблизи экватора согласуется с тем, что зона внутритропической конвергенции преимущественно находится в Северном полушарии. Понижение интенсивности и наличие площадок на средних широтах связано с влиянием центров действия атмосферы: Азорского и Южно-Атлантического антициклонов в Атлантическом океане, Гавайского и Южно-Тихоокеанского антициклонов в Тихом океане. Резкий рост вблизи  $60^\circ$  широты в обоих полушариях связан с попаданием в области исследования либо ледяного покрова, либо суши, яркостная температура которых гораздо выше температуры системы океан-атмосфера.

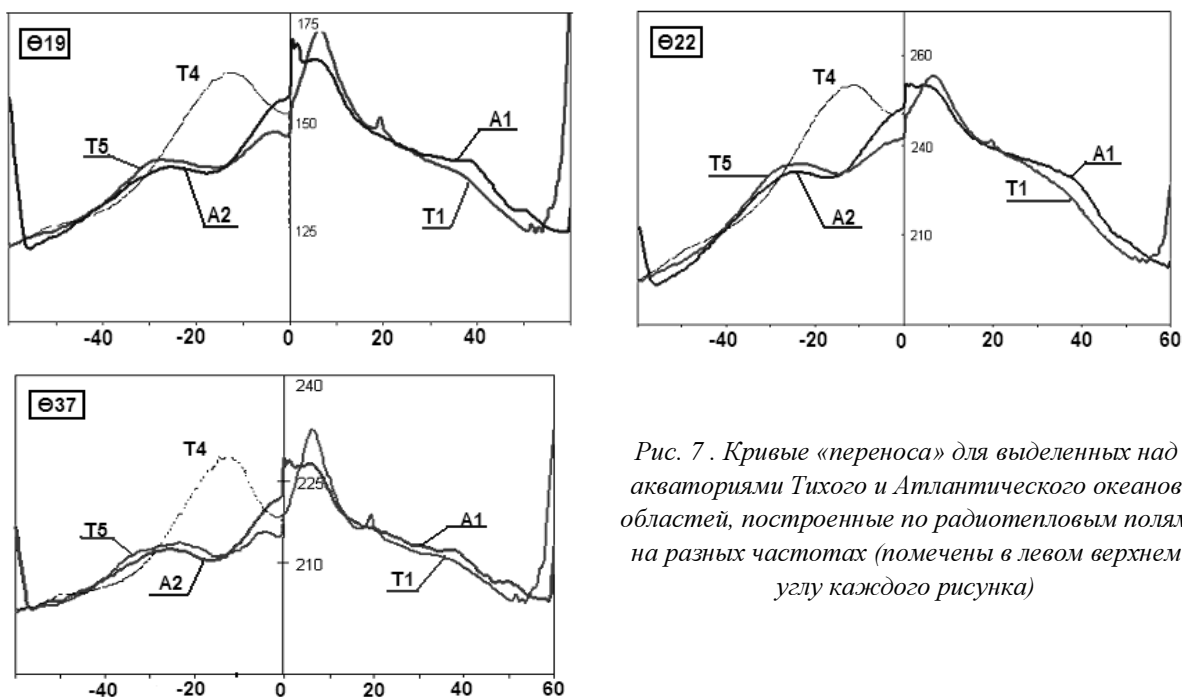


Рис. 7. Кривые «переноса» для выделенных над акваториями Тихого и Атлантического океанов областей, построенные по радиотепловым полям на разных частотах (помечены в левом верхнем углу каждого рисунка)

Отметим схожесть особенностей широтного распределения яркостной температуры на частотах 19,35, 22,24 и 37,00 ГГц. Следовательно, согласуются особенности распределения и перенос тех составляющих влаго- и водозапаса тропосферы, с которыми ассоциируется радиояркая температура на трех частотах. В основном, это водяной пар, содержащийся в воздухе, и выпадающие в момент регистрации дожди.

Влагозапас тропосферы является одной из важных характеристик климатической системы. Анализ общего влаго- и водосодержания атмосферы по спутниковым данным оказывается продуктивным на разных временных масштабах [4, 5]. На синоптических масштабах выявлена жесткая связь между вариациями общего влагосодержания атмосферы (спутниковые данные) и вариациями температуры и влажности приводного воздуха (метеорологические наземные измерения). Это показывает правомерность использования спутниковых СВЧ- радиометрических измерений для количественных оценок общего влаго- и водосодержания атмосферы на синоптических и больших временных масштабах.

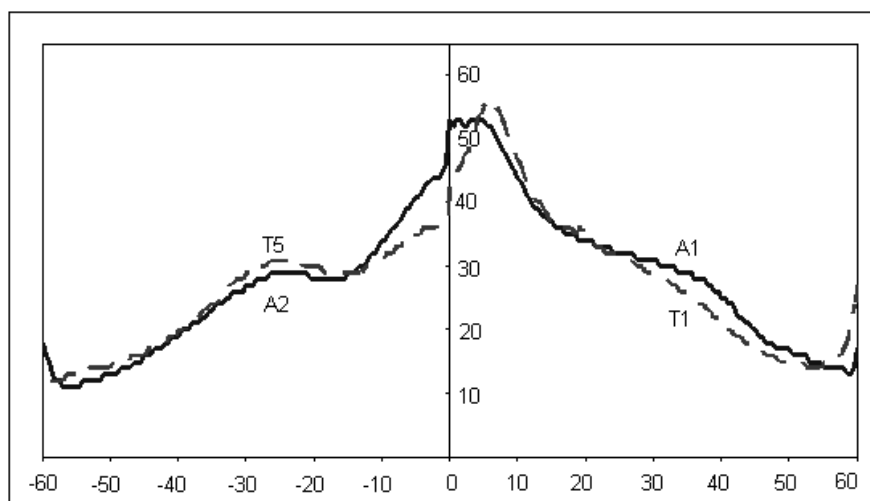


Рис. 8. Широтная зависимость влагозапаса тропосферы для областей над акваториями Тихого и Атлантического океанов

Для вычисления влагозапаса тропосферы над Мировым океаном по данным радиотеплового спутникового мониторинга используем формулу с полуэмпирическими коэффициентами

$$W(\text{kg}/\text{m}^2) = 131,9 - 30,5 \ln(280 - T_{\nu 22}) + 12,49 \ln(280 - T_{\nu 37}),$$

приведенную в [6]. Здесь  $T_{\nu 22}$  и  $T_{\nu 37}$  — радиояркая температура на частоте 22,24 и 37,00 ГГц.

Полученные результаты позволяют заключить, что рассмотренные характерные особенности распределения влагозапаса схожи с характерными особенностями кривых «переноса», полученных по значениям яркостной температуры на частотах 19,35, 22,24 и 37,00 ГГц. Полная аналогия характерных особенностей также прослеживается при рассмотрении и сравнении кривых для других областей над акваторией Мирового океана.

## Выводы и заключение

Широтно-временные диаграммы, построенные по серии глобальных радиотепловых полей за 2005 год [1] позволили изучить внутригодовые (сезонные, в частности) и некоторые региональные особенности распределения влагозапаса тропосферы. Кроме того, было показано, что распределение яркостной температуры во многом определяют горизонтальные атмосферные движения — вихри и фронты. Тропические циклоны играют важную роль в формировании переноса влаги (и, следовательно, тепла) из экваториальных областей в средние и средне – высокие широты.

В настоящей работе в основном исследовались региональные особенности долговременных изменений переноса влаги (и тепла) из приэкваториальных областей в средние и средне – высокие широты. Для этого были построены серии широтно-временных диаграмм (с использованием радиотепловых полей из электронной коллекции GLOBAL-Field). На основе широтно-временных диаграмм с целью изучения долговременных изменений распределения влагозапаса (путем усреднения диаграмм по большим отрезкам времени) были построены кривые «полярного переноса». Кривые содержат информацию о широтном распределении яркостной температуры (усредненной по времени и по долготе) и, соответственно, о широтном поведении переноса.

Проведен анализ широтно-временных диаграмм и кривых «переноса», построенных по радиотепловым полям  $\Theta 19$ ,  $\Theta 22$  и  $\Theta 37$  на трех частотах 19,35, 22,24 и 37,00 ГГц, содержащих информацию о распределении влаго- и водозапаса тропосферы за 7 лет — за период с 1999 по 2005 гг. Изучено широтное распределение усредненной по времени (за 7 лет) и долготе радиояркой температуры над акваториями двух океанов — Атлантического и Тихого. Выявлены региональные особенности распределения. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Изучение серии кривых «переноса» показало, что широтное распределение радиояркой температуры над акваториями Мирового океана существенно зависит от расположения крупномасштабных квазистационарных атмосферных структур — центров действия атмосферы (антициклонов и депрессий).

2. Совместный анализ карт треков тропических циклонов, глобальных радиотепловых полей, широтно-временных диаграмм и кривых «переноса» позволил сделать вывод о том, что широтное распределение яркостной температуры  $\Theta 19$ ,  $\Theta 22$  и  $\Theta 37$  определяют интенсивные горизонтальные вихревые движения в атмосфере, вызванные тропическими циклонами. Движения тропических циклонов, в частности, зависят от расположения центров действия атмосферы.

3. Анализ широтного распределения влагозапаса атмосферы по полуэмпирической формуле позволил изучить особенности распределения количества влаги над разными акваториями Мирового океана и сделать заключение о том, что радиотепловые поля  $\Theta 19$ ,  $\Theta 22$  и  $\Theta 37$  адекватно отражают распределение влагозапаса тропосферы. Они могут быть использованы как характеристики интегрального распределения пара воды и, соответственно, скрытого тепла в тропосфере.

Таким образом, полярный перенос влаги (и скрытого тепла) осуществляется, в основном, не меридиональной циркуляцией, а крупномасштабными горизонтальными вихревыми движениями



в атмосфере. Движениями, вызванными тропическими циклонами, формирующимися в приэкваториальной зоне, продвигающимися в более высокие широты и осуществляющими горизонтальный перенос энергии (влаги и тепла, в первую очередь). Результаты работы свидетельствуют о важной роли тропических вихрей в переносе влаги (и тепла) из экваториальных областей в высокие широты, вплоть до 60-70° широты. Следует отметить, что большое влияние на продвижение вихрей в атмосфере и, следовательно, на распределение влагозапаса по широте оказывает глобальное атмосферное окружение — расположение и интенсивность квазистационарных центров действия атмосферы, в частности.

### Литература

1. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Изучение полярного переноса в атмосфере Земли методами дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сб. статей. Вып.4. Том II. – М: ООО «Азбука-2000». 2007. – 420 с. С. 27-32.
2. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Глобальное радиотепловое поле системы океан – атмосфера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2005. том 2. С. 8-16.
3. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Глобальное радиотепловое поле системы океан – атмосфера по данным микроволновых космических комплексов // Исследования Земли из космоса, 2006, № 3. С. 64-69.
4. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан—атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела. М.: Физматлит, 2004.
5. Trenberth K. E., Fasullo J., and Smith L. Trends and variability in column integrated atmospheric water vapor // Clim. Dyn., 2005. № 24. 741– 758.
6. Ruprecht E. Adv. Space Res., 1996, Vol. 18, N 7, P. 5-16.