

Внутри- и междугодовые изменения влагозапаса тропосферы по данным спутникового мониторинга Земли

Н.М. Астафьева, М.Д. Раев, Е.А. Шарков

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32*

E-mails: ast@iki.rssi.ru; mraev@asp.iki.rssi.ru; easharkov@iki.rssi.ru

Исследуются пространственно-временные закономерности содержания в атмосфере водяного пара, характеризующего тепловой ресурс системы Земля – атмосфера и являющегося одним из фундаментальных параметров для анализа колебаний климатической системы. Изучаются сезонные и междугодовые изменения интегрального влагосодержания в атмосфере по результатам спутникового мониторинга Земли в период с 1999 по 2005 г. Используется информация семиканальных четырехчастотных СВЧ-радиометрических комплексов SSM/I, установленных на спутниках серии DMSP и принимающих линейно поляризованное излучение на частотах 19,35; 22,24; 37,0 и 85,5 ГГц. Поля радиояркостной температуры, построенные по данным SSM/I за сутки не полностью покрывают планету. Разработанные нами методики, основанные на межвитковом и кросс-аппаратном выравнивании и дополнении, позволили построить глобальные поля радиояркостной температуры (два полных глобальных поля в сутки), используя информацию всех спутников серии для заполнения лакун. Полученные глобальные радиотепловые поля пригодны для изучения термодинамических процессов в системе океан – атмосфера с масштабами от сотен километров до планетарных и изменяющихся на короткопериодных (синоптических, мезометеорологических), внутригодовых (среднемесячных, сезонных) и больших (междугодовых) временных масштабах. Поля собраны в электронной коллекции GLOBAL – Field, <http://www.iki.rssi.ru/asp/>.

Проведен анализ структуры глобальных полей радиояркостной температуры Θ_{22} (полученных на частоте 22,24 ГГц и характеризующих влагозапас (интегральный) тропосферы) с усреднением по разным временным масштабам — месяц, сезон, год и более. Влагозапас — важная характеристика, с которой связано количество и перенос тепла в атмосфере. Изучена широтная и региональная изменчивость влагозапаса атмосферы на основе глобальных радиотепловых полей Θ_{22} . Поля отклонений (от среднегодовых, сезонных и многолетних радиотепловых полей) обладают заметной региональной зависимостью и временной изменчивостью. Обнаружены региональные вариации интегрального влагосодержания в зонах активного циклогенеза и в основных центрах действия атмосферы: области повышенного влагосодержания в тропической атмосфере соответствуют зонам активного тропического циклогенеза; в основных центрах действия системы океан–атмосфера обнаружены противофазные вариации интегрального влагосодержания. Рассматриваются возможные варианты физических механизмов «быстрых» (синоптических) региональных вариаций интегрального влагосодержания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 06-05-64276-а.

Введение

Распределение влаги (и тепла) в тропосфере и процессы переноса тепла и массы (влаги особенно) в системе океан – атмосфера являются важными факторами изменчивости климатической системы Земли [1]. Актуальность исследования крупномасштабных термодинамических процессов в системе океан – атмосфера, годового хода, сезонной, межгодовой и долговременной изменчивости климата признана международным сообществом и подтверждается в ходе деятельности международных и федеральных программ изучения Мирового океана, атмосферы, гео- и биосферы, а также изменчивости и прогнозируемости климата (ВПИК, МГБП, GCRP, EOS, CLIVAR и других). Климатическая система — среда обитания человечества. Поэтому проблема изменчивости климата имеет не только фундаментальное научное, но и важное практическое значение.

Термодинамические взаимодействия в системе океан – атмосфера, оказывающие существенное воздействие на транспортные и диссипативные свойства атмосферы и влияющие на формирование климата, имеют большую пространственную протяженность, достаточно длительны, характеризуются сложной пространственно-временной структурой и эволюционируют в широком диапазоне временных и пространственных масштабов. Для выявления общих закономерностей таких процессов необходим анализ данных наблюдений, представительно характеризующих их энергетику

и динамику — необходимы достаточно большая временная и пространственная протяженность данных, а также достаточно хорошая регулярность и плотность покрытия. Обеспечить глобальные наблюдения геофизических параметров в виде полей, удовлетворяющих этим требованиям, в настоящее время могут лишь приборы, установленные на искусственных спутниках Земли.

Современные ИК- и СВЧ-радиометрические приборы, установленные на ИСЗ, позволяют получать глобальные данные наблюдения полей собственного излучения земных покровов, Мирового океана и атмосферы (в отличие от оптического диапазона, где принимается отраженное солнечное излучение), это данные радиометров SSMR (ИСЗ NIMBUS 7), SSM/I (ИСЗ DMSP), AMSR (ИСЗ ADEOS-II), AMSR-E (ИСЗ Aqua) в микроволновом диапазоне и AVHRR (ИСЗ NOAA) в ИК-диапазоне.

В настоящей работе используются данные СВЧ-радиометрических приборов SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager), установленных на космических аппаратах F10–F15 серии DMSP (Defense Meteorological Satellite Program). Программа DMSP — это программа долговременного мониторинга Земли в микроволновом диапазоне, поставляющая оперативную глобальную метеорологическую, океанографическую и солнечно-геофизическую информацию. В ИКИ РАН (лаборатория климатических исследований) создана и постоянно пополняется электронная база GLOBAL – T данных спутникового мониторинга Земли, полученных в рамках программы DMSP. На настоящий момент база полосовых данных GLOBAL – T содержит информацию за период с 1995 по 2006 г.

Космические аппараты серии DMSP летают на высоте 833 км; имеют солнечно-синхронную близкую к полярной низкую почти круговую орбиту; ширина полосы обзора приборов SSM/I составляет 1394 км; элемент разрешения на поверхности 12,5–25 км; подспутниковые дорожки повторяются каждые 16 суток; глобальное покрытие Земли осуществляется примерно за трое суток. Семиканальные четырехчастотные радиометрические комплексы SSM/I, установленные на спутниках серии DMSP, принимают линейно поляризованное излучение на частотах 19,35; 22,24; 37,0 и 85,5 ГГц в режиме конусного сканирования. На частоте 22,24 ГГц измеряется только вертикально поляризованное излучение; на остальных — и горизонтально и вертикально поляризованное. Специфика траекторий спутников серии и полей зрения приборов такова, что покрытие данными густое на высоких широтах, но оставляет большие лакуны (не покрытые данными области) на средних широтах, особенно вблизи экватора. На полях радиояркостной температуры, построенных по информации одного спутника в течение суток, площадь стандартных лакун составляет около 25 % поверхности Земли; потери за счет сбоев приемной или передающей аппаратуры могут быть иногда больше.

Разработанные нами методики (алгоритм межвиткового и кросс-аппаратного выравнивания и дополнения) позволяют на основе полосовых данных базы GLOBAL – T формировать глобальные радиотепловые поля Земли (по два поля в сутки), используя для дополнения данные всех космических аппаратов серии DMSP. Созданная нами электронная коллекция GLOBAL – Field содержит глобальные поля радиояркостной температуры в четырех микроволновых диапазонах за период с 1996 по 2005 г. Каталог коллекции представлен на сайте ИКИ (<http://www.iki.rssi.ru/asp/>). Там же можно увидеть примеры построенных полей и небольшие анимации, демонстрирующие пространственно-временную динамику радиотеплового поля Земли.

Первые варианты глобальных радиотепловых полей, построенных авторами с использованием методики межвиткового и кросс-аппаратного выравнивания и дополнения, продемонстрированы в [2–4].

Радиометрические приборы SSM/I предоставляют яркостную температуру, свидетельствующую:

- о состоянии видимой поверхности (континенты, океан, наиболее плотные облачные структуры с жидкими осадками) — на частоте 19,35 ГГц;
- о распределении интегрального влагозапаса (пар воды) атмосферы — на частоте 22,24 ГГц;

- об интегральном водозапасе атмосферы — на частотах 37,0 и 85,5 ГГц.

Данные каналов радиометров SSM/I используются для определения скорости ветра, влагосодержания (интегрального) атмосферы над Мировым океаном, водозапаса облачных структур и зон интенсивного выпадения осадков, оценки потоков тепла и импульса.

Оценки показывают правомерность использования спутниковых СВЧ-радиотепловых полей, для изучения термодинамических процессов в системе океан – атмосфера на короткопериодных (синоптических и мезометеорологических), внутригодовых (среднемесячных и сезонных) и больших (междугодовых) временных масштабах [5].

В настоящей работе показаны некоторые возможности использования глобальных полей яркостной температуры для детального изучения пространственно-временного распределения интегрального влагозапаса (пара воды) в атмосфере Земли. Влагозапас является одним из фундаментальных параметров для анализа колебаний климатической системы. Это важная характеристика состояния системы океан – атмосфера, с которой тесно связано количество и перенос тепла в атмосфере.

Распределение интегрального влагозапаса атмосферы Земли

Одним из характерных параметров системы океан – атмосфера и климатической системы планеты является общее влагосодержание атмосферы — интегральный параметр, характеризующий процессы тепло- и влагообмена в системе в целом. В водяном паре в виде скрытого тепла сосредоточена значительная доля общего тепла системы. Кроме того, общее влагосодержание атмосферы тесно связано с яркостной температурой в резонансной линии излучения водяного пара (1,35 см). Вариации яркостной температуры на частоте 22,24 ГГц (1,35 см) четко фиксируются при наблюдениях со спутников серии DMSP многоканальным радиометром SSM/I.

Радиометрические спутниковые данные, вообще говоря, могут быть использованы *опосредованно* — для восстановления общепринятых значений метеорологических характеристик на основе имеющихся представлений, косвенных связей или полуэмпирических формул, а также *непосредственно* в качестве прямых характеристик теплового и динамического взаимодействия атмосферы и океана. Последнее время второй путь использования данных микроволнового зондирования Земли используется все чаще. Например, обнаружена тесная связь между сезонной динамикой среднемесячных значений яркостной температуры и разностью температур поверхности океана и приводной атмосферы — явное преимущество спутниковых данных перед отдельным измерением температур поверхности океана и приводной атмосферы дистанционными методами для получения их разности, что приводит к заметным потерям точности. Путь прямого использования радиометрических спутниковых данных представляется нам более перспективным также и потому, что он свободен от имеющихся модельных представлений. Его действенность, что очень существенно, подтверждается и на синоптических масштабах в ситуациях, когда формализация самих процессов становится затруднительной (фронтальные зоны, циклоны и другие области больших градиентов).

В настоящей работе глобальные поля радиояркостной температуры Θ_{22} из электронной коллекции GLOBAL – Field, полученные на частоте 22,24 ГГц, используются в качестве прямой характеристики распределения влагозапаса тропосферы для изучения его изменчивости. Влагозапас — важная характеристика, с которой тесно связано количество и перенос тепла в атмосфере.

На рис. 1 (слева) представлено поле радиояркостной температуры Θ_{22} , характеризующее распределение влагозапаса в атмосфере Земли. Оно построено по данным от 6 августа 2005 г. В это

время большое количество влаги сосредоточено над экваториями Мирового океана в низких и средних широтах. На том же рисунке (справа) представлено радиотепловое поле Θ_{22} , среднее по рассматриваемому в настоящей работе семилетнему диапазону времени (с 1999 по 2005 г.). Оно характеризует среднее за семь лет распределение влагозапаса в атмосфере Земли.

На этом рисунке и далее глобальные радиотепловые поля показаны в меркаторской проекции, в верхней части рисунка слева показана цветовая шкала радиояркостной температуры (на всех представленных картинах глобальных радиотепловых полей она одинакова). Поле расширено на 90 градусов по долготе для удобства — чтобы все экватории Мирового океана были показаны полностью.

Существует согласие между распределением яркостной температуры Θ_{22} по планете и тропическим циклогенезом. Области высокого содержания влаги в атмосфере над экваториями МО практически совпадают с зонами активного тропического циклогенеза. На рис. 2 представлено среднее за двухтысячный год поле распределения яркостной температуры Θ_{22} (слева) и карта (также в меркаторской проекции), на которой схематически показаны области формирования тропических циклонов (помечены белым цветом), а также нанесены некоторые наиболее типичные траектории продвижения тропических циклонов над экваториями Мирового океана.

Среднегодовые поля распределения влагосодержания за рассматриваемый семилетний период (1999–2005) на первый взгляд практически неотличимы. Однако, поля отклонения $\Delta 1999 - \Delta 2005$ среднегодовых полей яркостной температуры Θ_{22} от среднего за 7 лет, показанные на рис. 3, заметно отличаются друг от друга, демонстрируя интересные межгодовые изменения. В цветовой гамме полей отклонений $\Delta \Theta_{22}$ на рис. 3 зеленый цвет соответствует близким к нулю значениям, сине-голубая гамма — отрицательным, а красно-розовая — положительным отклонениям от среднего за 7 лет поля (цветовая шкала показана на рис. 3 в верхнем ряду). На поля $\Delta \Theta_{22}$ нанесена координатная тридцатиградусная сетка.

Междугодовая динамика полей отклонений влагозапаса $\Delta \Theta_{22}$ отражает основные особенности общей циркуляции атмосферы, в частности, такие квазистационарные крупномасштабные атмосферные осцилляции, как Антарктическая, Северо-Атлантическая, Индо-Тихоокеанская и другие.

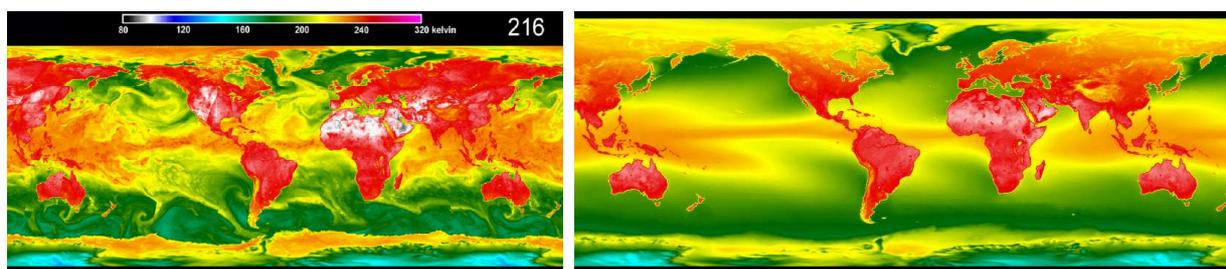


Рис. 1. Поле радиояркостной температуры Θ_{22} , характеризующее распределение влагозапаса в атмосфере Земли по данным от 6 августа 2005 г. — слева; справа — радиотепловое поле Θ_{22} , среднее по диапазону времени от 1999 до 2005 гг.

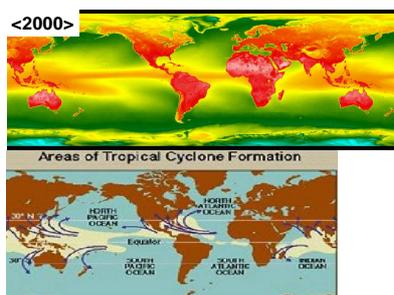


Рис. 2. Среднегодовое поле распределения Θ_{22} в 2000 году и схема областей формирования тропических циклонов

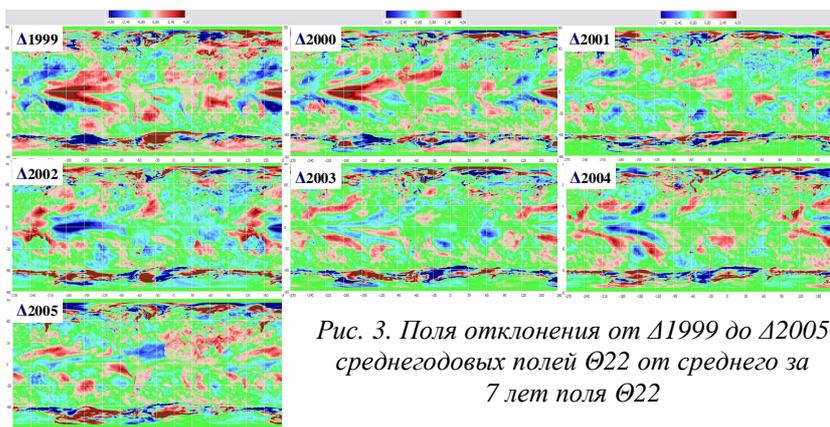


Рис. 3. Поля отклонения от $\Delta 1999$ до $\Delta 2005$ среднегодовых полей Θ_{22} от среднего за 7 лет поля Θ_{22}

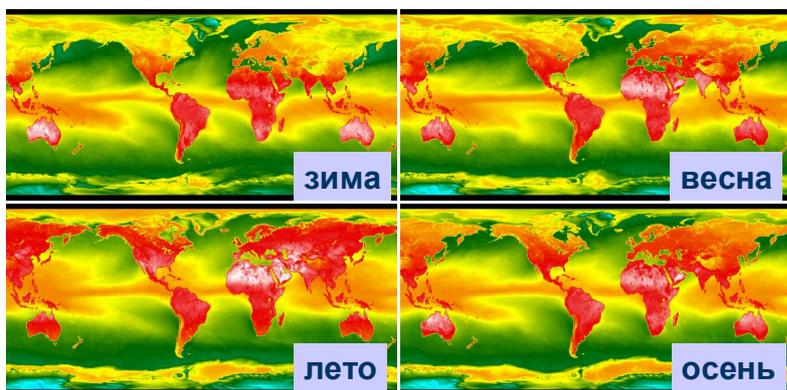


Рис. 4. Поля распределения средней за соответствующий сезон года радиояркостной температуры Θ_{22} , построенные по данным микроволнового мониторинга Земли в 2005 г.

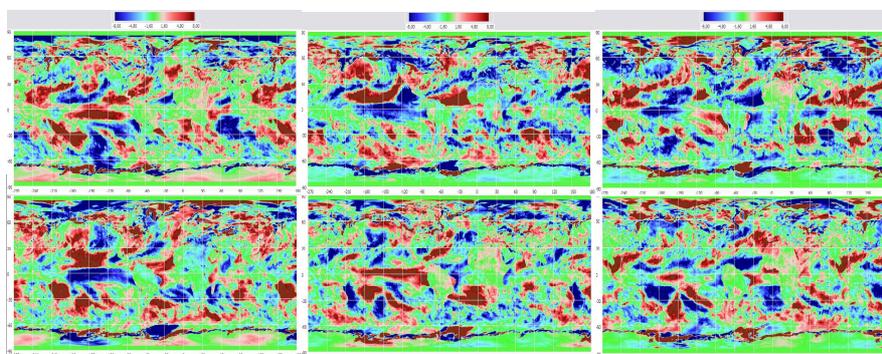


Рис. 5. Поля отклонений влагосодержания $\Delta\Theta_{22}$ в январе текущего года от того же месяца предыдущего года (за период 1999–2005 гг.)

Поля отклонений $\Delta\Theta_{22}$ в 1999 и 2000 гг. заметно отличаются от среднего за рассматриваемый период: положительные $\Delta\Theta_{22}$ над акваторией тропической зоны восточной части Тихого океана и отрицательные в западной части сохраняются в продолжение этих двух лет с той разницей, что в 1999 г. более интенсивна южная ветвь положительных $\Delta\Theta_{22}$, простирающаяся до Атлантики в Южном полушарии, а в 2000 году более интенсивна северная ветвь, захватившая всю южную часть Атлантики в Северном полушарии.

Поля отклонений $\Delta\Theta_{22}$ в 2003–2005 гг. во многих деталях повторяют полученные в 1999–2001 гг., но со знаком минус. Причиной такого противофазного поведения полей отклонений в 1999–2001 гг. и 2003–2005 гг. может быть явление Эль-Ниньо.

Рассмотрены распределения средней за сезон или месяц радиояркостной температуры Θ_{22} на примере данных микроволнового мониторинга Земли в 2005 г. Межсезонные изменения влагосо-

держания существенно заметнее междугодовых: если среднегодовые поля яркостной температуры отличаются от среднего за 7 лет не более чем на $\pm 11,3\%$, то отличия влагосодержания между сезонами одного года находятся уже в диапазоне $\pm 34,3\%$. На рис. 4 показаны сезонные поля влагозапаса, построенные по данным 2005 г. На примере полей распределения Θ_{22} ясно видны отличия работы северного и южного полушарий Земли в разные сезоны года.

Поля отклонений на следующем рис. 5 демонстрируют изменения, которые происходят от года к году между среднемесячными отклонениями одного и того же месяца. Для примера на рисунке представлены отклонения $\Delta\Theta_{22}$ среднего распределения влагозапаса за январь месяц от такого же поля следующего года. Максимальные отклонения влагосодержания между январями за рассмотренные 7 лет составляют не более $\pm 31,1\%$. Основные крупномасштабные осцилляции хорошо заметны и на этих полях.

Заключение и выводы

Многоканальные радиометрические приборы SSM/I предоставляют, в частности, яркостную температуру в резонансной линии излучения водяного пара на частоте 22,24 ГГц (1,35 см), четко фиксируя вариации яркостной температуры при наблюдениях со спутников серии DMSP. Радиояркостная температура Θ_{22} рассматривается нами как прямая характеристика теплового и динамического взаимодействия атмосферы и океана. С яркостной температурой в резонансной линии излучения водяного пара тесно связано общее влагосодержание атмосферы — интегральный параметр, характеризующий процессы тепло- и влагообмена в системе в целом. В водяном паре в виде скрытого тепла сосредоточена значительная доля общего тепла климатической системы. Процессы переноса тепла и массы (влаги особенно) в системе океан – атмосфера являются важными факторами изменчивости климатической системы Земли.

Анализ общего влагосодержания атмосферы оказывается продуктивным на разных временных масштабах. При сравнении среднемесячных полей яркостной температуры Θ_{22} замечены индивидуальные зависимости в разных физико-географических зонах и четко выраженные сезонные вариации. Для проблемы изменчивости климата представляет большой интерес изучение межгодовой изменчивости. На синоптических масштабах выявлена жесткая связь между вариациями общего влагосодержания атмосферы и вариациями температуры и влажности приводного воздуха по метеорологическим наземным измерениям [5]. Это показывает правомерность использования общего влагосодержания атмосферы, полученного при спутниковых СВЧ-радиометрических измерениях, для количественных оценок не только на внутригодовых (среднемесячных, сезонных) и больших (межгодовых) масштабах, но и на короткопериодных (синоптических).

Поля отклонения $\Delta\Theta_{22}$ среднегодовых полей яркостной температуры Θ_{22} от среднего за рассматриваемый в настоящей работе семилетний диапазон времени (1999–2005) заметно отличаются друг от друга. Межгодовая динамика полей отклонений влагозапаса $\Delta\Theta_{22}$ отражает основные особенности общей циркуляции атмосферы, в частности, квазистационарные крупномасштабные атмосферные осцилляции и центры действия.

Существует согласие между усредненным по времени распределением яркостной температуры Θ_{22} по планете и глобальным тропическим циклогенезом. Области высокого содержания влаги в атмосфере над экваториями МО практически совпадают с зонами активного тропического циклогенеза.

Данные микроволнового спутникового мониторинга — поля яркостной температуры Θ_{22} , усредненные по разным диапазонам времени поля и поля отклонений влагозапаса $\Delta\Theta_{22}$ — демонстрируют интересные внутри- и междугодовые изменения. Сравнение их изменений с вариациями известных общепринятых характеристик еще раз подтверждает, что радиояркостную температуру в микроволновых диапазонах следует рассматривать как полноценную характеристику пространственно-временных изменений термодинамических процессов, происходящих в системе океан – атмосфера.

Литература

1. *Кондратьев К.Я.* Глобальный климат // СПб.: Наука, 1992. 359 с.
2. *Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А.* Глобальное радиотепловое поле системы океан – атмосфера // Современ. проблемы дистанцион. зондирования из космоса: Сб. науч. статей. Т. 2. М.: GRANP polygraph, 2005. С. 8–16.
3. *Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А.* Глобальное радиотепловое поле системы океан – атмосфера по данным микроволновых космических комплексов // Исслед. Земли из космоса, 2006. № 3. С. 64–69.
4. *Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А.* Портрет Земли из космоса. Глобальное радиотепловое поле // Природа, 2006. № 9. С. 17–27.
5. *Гранков А.Г., Мильшин А.А.* Взаимосвязь радиоизлучения системы океан – атмосфера с Тепловыми и динамическими процессами на границе раздела // М.: Физматлит, 2004. 168 с.